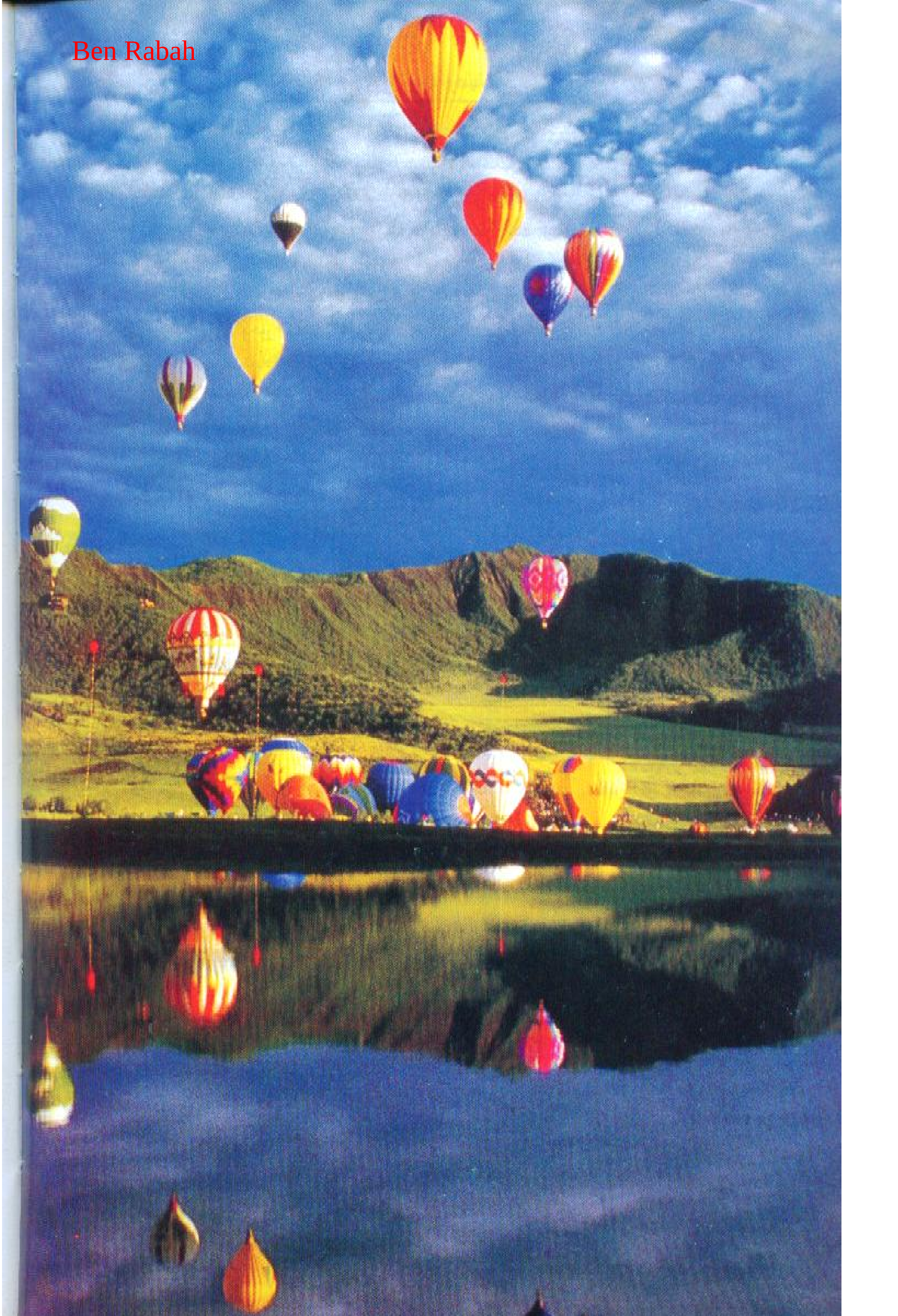


Ben Rabah

الجزء الثانى

الخواص الميكانيكية والحرارية للمادة : الذبذبات والموجات

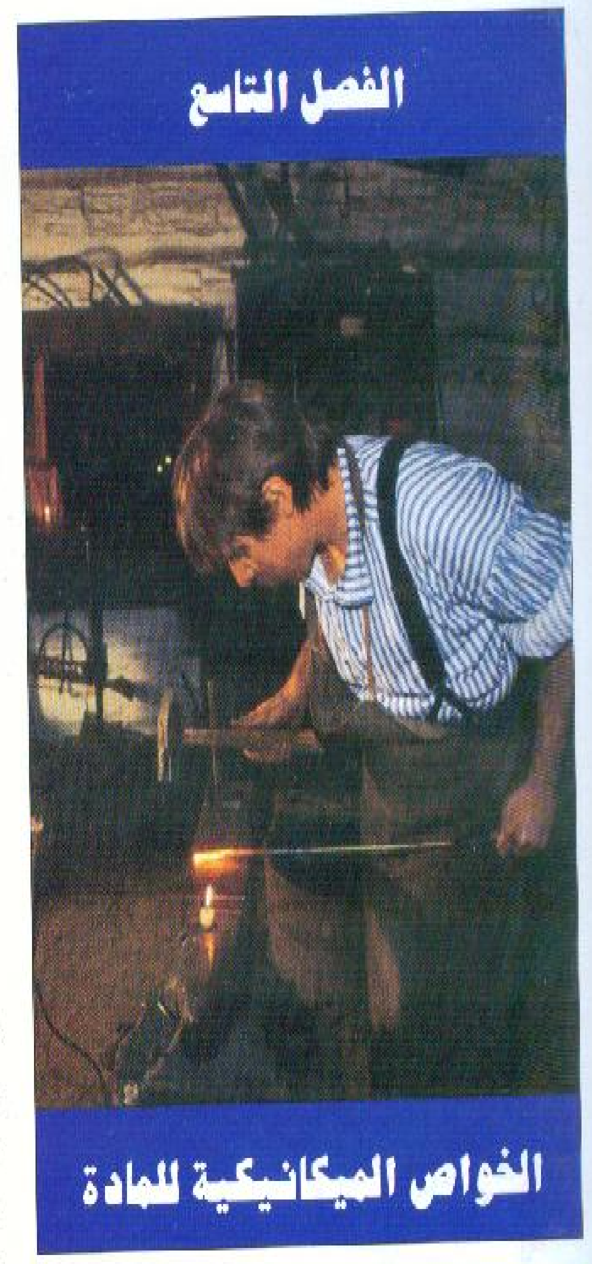
لكى ترى الحرارة تنتقل من جسم بارد الى اخر ساخن ليس من الضرورى أن تكون لديك الرؤية الحادة أو ذكاء وبراعة شيطان ماكسويل . يكفيك أن تتحلى ببعض الصبر .

هنرى بوانكير

بعد أن طورنا مفهومى الكتلة والقوة وتعلمنا بعض المبادئ اللازمة لوصف حركة المادة يمكننا أن نوجه اهتمامنا الآن إلى البحث فى الخواص الداخلية للمادة . وقبل أن يعرف أى شىء عن الذرات والجزيئات قام العديد من الفيزيائيين بدراسة الخواص الكلية ، أو الماكروسكوبية ، للمادة . ففى القرن الثالث قبل الميلاد تمكن المهندس الإغريقى أرشميدس من تفسير قوة الدفع التى يؤثر بها سائل على جسم مغمور فيه . وفى القرنين السابع عشر والثامن عشر نجح الباحثون فى وضع القوانين التى تصف تأثير الضغط ودرجة الحرارة على الغازات المختلفة . وفى نفس هذه الفترة تمت أيضًا دراسة الحالات الفيزيائية المختلفة للمادة (الصلبة والسائلة والغازية) وكذلك درجة استطالة وانضغاط المادة عند تعرضها لتأثير القوى الخارجية . ومن بين الظواهر الأخرى المترتبة على الخواص الماكروسكوبية يمكن ذكر الطريقة التى تنساب بها الموائع والعلاقة بين الحرارة المضافة إلى مادة والتغير الناتج فى درجة الحرارة أو التغير فى الحالة .

ظلت دراسة الحرارة والخواص الحرارية للمادة تسير فى طريق منفصل عن دراسة الميكانيكا حتى منتصف القرن التاسع عشر . ويعتبر التوصل إلى فهم الحرارة باعتبارها نوعًا من الطاقة وأن وحدات قياس كميات الحرارة لها ما يكافؤها من وحدات الطاقة الميكانيكية واحدًا من أهم الإنجازات التى تحققت فى هذا القرن ، وهذا ما سنتعرض لوصفه فى مقالات « الخلافات العظيمة » فى الفصل الحادى عشر . كذلك فإن قوانين الديناميكا الحرارية ، التى تصف إمكانية تحويل الحرارة إلى شغل والشغل إلى حرارة ، هى المبادئ الأساسية لعمل الآلات الحرارية والمبردات .

كذلك هناك مجموعة كبيرة من الظواهر المترتبة على الذبذبات ، أو الاهتزازات ، وهى الحركة التى تتكرر على فترات منتظمة (أو فى دورات منتظمة) . ومثل هذه الحركة ، كالبندول مثلاً ، تمدنا بطريقة سهلة مناسبة لقياس الوقت . علاوة على ذلك فإن الخواص الحجمية للمادة هى التى تتعين بها كيفية انتقال الاهتزازات فى مختلف المواد على صورة موجات ، والتى تعتبر أساس فهمنا للصوت ومبادئ عمل الآلات الموسيقية .



تتكون كل المواد من ذرات . والقوى بين ذرات المادة ذات طبيعة كهربائية أساسًا وذلك لأن الذرات نفسها مكونة من جسيمات مشحونة (إلكترونات وبروتونات) . والواقع أن الطريقة التى ترتب بها الذرات نفسها فى المادة وتتكون بها مجموعات الذرات هى التى تحدد السلوك الحجمى للمادة . هذه الخواص الحجمية للمادة ، وهى ما يعرف عادة بالخواص **الميكانيكية** ، هى التى تمثل غالبًا القدر الأكبر من الأهمية لمعظم الأغراض العملية ، بدلاً من الوصف الذرى التفصيلى للمادة . وسوف نتناول بالدراسة فى هذا الفصل بعض الخواص الميكانيكية كالكثافة والمرونة وضغط وانسياب الموائع .

9-1 حالات المادة

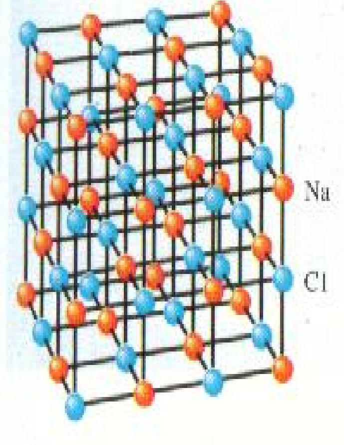
يتكون العالم من حولنا من ثلاثة أنواع متميزة من المواد : الجوامد والسوائل والغازات ، وسوف نسمى هذه الأنواع بحالات المادة الثلاث . ويكمن الفرق الأساسى بين هذه الحالات فى طريقة تأثير القوى بين الذرات أو الجزيئات المكونة للمادة . ففى الغازات تكون القوى بين الذرية غير موجودة عمليًا . وهذا ما يسمح لذرات (أو جزيئات) الغاز المنفردة بأن تتحرك مستقلة عن بعضها البعض ، إلا أثناء التصادمات التى تحدث بين جزيئات الغاز . هذه الحرية فى الحركة تسمح أيضًا

للغاز بأن يملأ أي حجم متاح له . أما فى السوائل والجوامد فإن هـذه القـوى تكـون كبيرة جـدًا لدرجة أن القوى الخارجية لا يمكنها أن تغير الحجم الـذى تشغله عينة من المادة الصلبة (الجامد) أو السائل تغييرًا محسوسًا ، ولــهذا يقـال أن الجوامـد والسوائل **غير قابلة للانضغاط** . وفى **الجوامد** ترتب القوى بين الذريـة ذرات المـادة فى نظام جاسئ ثلاثى الأبعاد ، أو بنية شبيكية . ولـهذا السبب لا تكـون الجوامـد غير قابلة للانضغاط فقط ، بل أنها تكون **جاسئة أيضًا** بحيث تقاوم محاولات تغيير شكلـها . ونظرًا لأن هذه البنية الثلاثية الأبعاد غير موجودة فى السوائل فإن **قابلية التشوه** السـوائل كبيرة بحيث تأخـذ شكل الإناء الـذى تشغله ويمكنها الانسياب تحت تأثير القوى عليها .

صلب — +حرارة → سائل — +حرارة → غاز

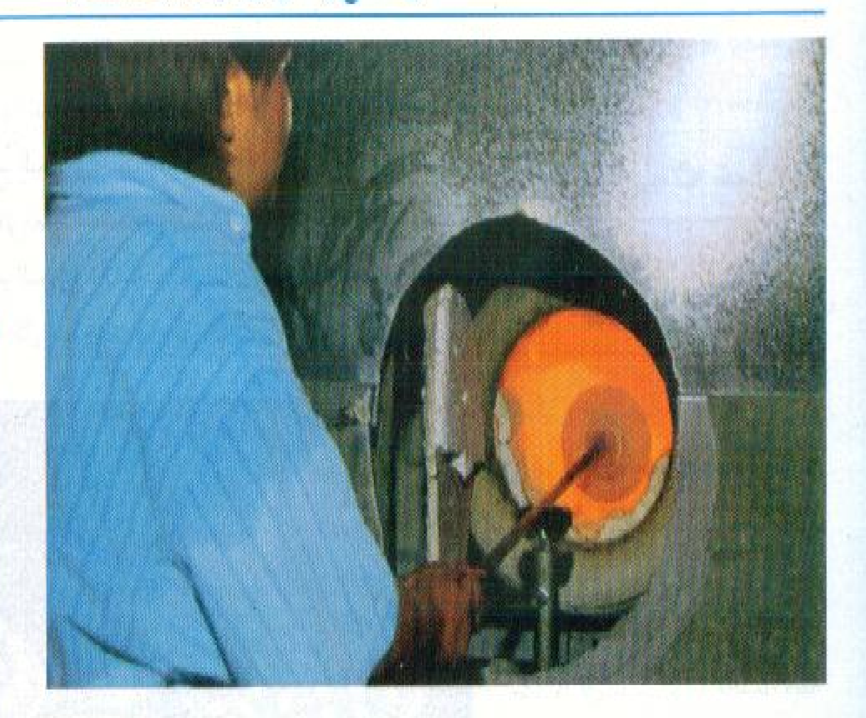
شكل 1-9 :
يمكن أن يتواجد الماء فى ثلاث حالات .

تتوقف الحالة التى توجد فيها مادة معينة على درجة حرارة المادة والضغط الخارجى المحيط بها . فالماء مثال مألوف لنا جميعًا إذ تتغير حالته من الحالـة الصلبـة إلى السـائلة إلى الغازية (البخارية) عند امتصاصه للحرارة (شكل 1-9) .



شكل 2-9 :
جزء صغير مـــن بلـورة ملـح الطعـام (NaCl) .

وبالرغم من أن هذا التقسيم يبدو بسيطًا فإن هناك حالات كثيرة يصعب فيها التمييـز بين حالات المادة . فمثلاً ؛ معظم الجوامد لــها بنيـة شبيكيـة مرتبـة ثلاثيـة الأبعـاد ؛ وهذه تعرف باسم **الجوامد البلورية** ؛ ويمثل الشكل 2-9 التماثل المكعبى لأحد الجوامد البلورية وهو ملح الطعام . وهناك أيضًا نوع آخر من الجوامد تكون ذراتـه مرتبـة بطريقـة عشوائية لا تتميز بهذا الترتيب المنتظم بعيد المـدى . هـذه الجوامـد تسـمى بـالجوامد **الأمورفية أو غير البلورية** ، وهى غالبًا تنساب ببطئ شديد جدًا جـدًا ويتغـير شكلـها بمرور السنين . والزجاج وكثير من اللدائن من أشهر أمثلة هذا النوع من الجوامد . وبعكس الجوامد البلورية فإن الجوامد الأمورفية ليس لـها نقطـة انصـهار حـادة محـددة ؛ فعنـد تسخين مثل هذه المواد سـوف نجد أن تزداد تشابها مع السوائل بشكـل تدريجـى وليس فجائيًا وتزداد مع هذا قابليتها للانسياب ويشاهد مثل هـذا الغمـوض فـى الانتقـال بـين حالات المادة أيضًا عند الضغوط العالية ، حيـث يكـون التحـول بـين الحـالتين الغازيـة والسائلة غير واضح فى كثير من المواد .



ينساب الزجاج كسائل لزج عند درجات الحرارة العالية جدًا .

جدول 1–9 الكثافات

المادة	الكثافة (kg/m^3)
الغازات (عند 1 atm و 0°C، ما لم ينص على غير ذلك)	
هواء	1.29
هواء (20°C)	1.20
هيليوم	0.179
ثاني أكسيد الكربون	1.98
السوائل (عند 20°C ما لم ينص على غير ذلك)	
ماء (4°C)	1.00×10^3
ماء	0.998×10^3
ماء البحر	1.025×10^3
كحول إيثيلي	0.79×10^3
زئبق (0°C)	13.6×10^3
بنزين السيارات	0.860×10^3
الجوامد (عند 20°C)	
ألومنيوم	2.70×10^3
عظم (تقريبًا)	1.8×10^3
نحاس أصفر	8.7×10^3
نحاس	8.89×10^3
زجاج (تقريبًا)	2.6×10^3
ذهب	19.3×10^3
جرانيت	2.7×10^3
ثلج (0°C)	0.92×10^3
حديد	7.86×10^3
رصاص	11.3×10^3
أوزميوم	22×10^3

جدول 2–9 كثافة الماء

درجة الحرارة (0°C)	الحالة	الكثافة (g/cm^3)
0	صلب	0.917
0	سائل	0.9998
3.98	سائل	1.000
10	سائل	0.9997
25	سائل	0.9971
100	سائل	0.9584

9-2 الكثافة والوزن النوعي

كثيرًا ما نستخدم خاصية للمادة تسمى **الكثافة** ، وهي تعرف كالتالي :

$$\text{الكثافة} = \frac{\text{كتلة المادة}}{\text{حجم المادة}}$$

وتمثل الكثافة بالحرف اليوناني ρ (رو) . وهكذا ، إذا كان حجم جسم ما V وكتلته m فإن كثافته تكون :

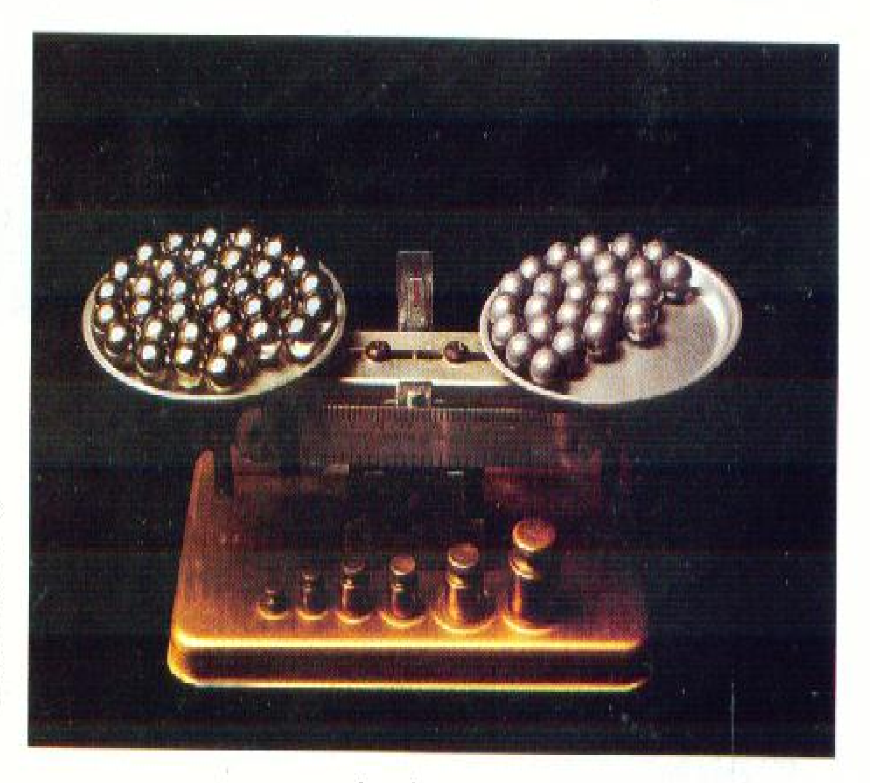
$$\rho = \frac{m}{V} \qquad (9\text{-}1)$$

الوحدة SI للكثافة هي الكيلو جرامات لكل متر مكعب ، ولكن تعطى الكثافة أحيانًا بالجرامات لكل سنتيميتر مكعب ، ويمثل الجدول 1–9 القيم النمطية لكثافة بعض المواد .

ونظرًا لأن معظم المواد تتمدد بزيادة درجة حرارتها فإن الكثافات تقل عادة بتسخين هذه المواد . الاستثناء المشهور من هذه « القاعدة » هو الماء بين درجتي 0°C و 4°C . ففي حالة الثلج تكون جزيئات H_2O مرتبة في شبيكية تكون فيها ذرات الأكسجين مجسمات رباعية السطوح . هذا الترتيب في ثلاثة أبعاد يؤدي إلى تكوين قرص نحل من الفراغات السداسية الخالية بين المجسمات رباعية السطوح ، ولهذا تكون كثافة الثلج صغيرة نسبيًا . وعند انصهار الثلج تظل بعض المجسمات رباعية السطوح موجودة عند 0°C ، ولكنها تستطيع الحركة بالنسبة إلى جيرانها لتملأ بعض الفراغات السداسية الخالية ، وهذا يؤدي إلى زيادة قدرها 10 في المائة تقريبًا في الكثافة عند الانصهار . وإذا ما ارتفعت درجة الحرارة عن 4°C سوف تتسبب الطاقة الحرارية العالية للجزيئات في زيادة متوسط المسافة بين الجزيئات كما في حالة المواد الأخرى . هذا ويلخص الجدول

9-2 السلوك الغريب لكثافة الماء حول نقطة التجمد .

هذه الخاصية من خواص الماء لها نتائجها الهامة في العالم من حولنا ، فهي تعني أن الثلج يتكون في الشتاء على سطح البحيرات والأنهار وليس في قاعها ، وهذا بدوره يسمح للثلج بالانصهار في الربيع عند تعرضه للشمس والرياح الدافئة . ويحدث في عملية التجمد أن يهبط الماء البارد من سطح البحيرة ليسمح بذلك للماء الدافئ بالارتفاع إلى أعلى . هذا « التقليب » يقوم بأعباء أكسجة كل مستويات الماء في البحيرة مرتين في كل عام .

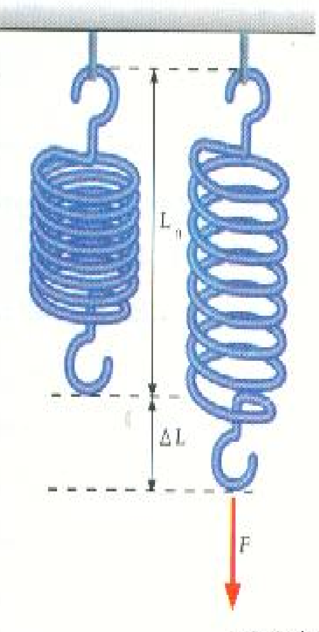


كريات الرصاص (على اليمين) وكريات الصلب (على الشمال) متساوية في الحجم . وحيث أن كثافة الرصاص أكبر من كثافة الصلب فإن عددًا أقل من كريات الرصاص يتساوى في الوزن مع عدد أكبر من كريات الصلب .

الوزن النوعي (SG) خاصية مرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالكثافة ، وتعرف بالنسبة بين كثافة المادة وكثافة الماء عند 4°C :

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}} \tag{9-2}$$

لاحظ أن الوزن النوعي **عدد لا بعدي** ، فمثلاً ، الوزن النوعي للرصاص والألومنيوم ، طبقًا للجدول 1-9 ، يساوي 11.3 و 2.70 على الترتيب .



شكل 3-9 :
يتناسب التشوه ΔL تناسبًا طرديًا مع F في حالة هذا الزنبرك الذي يتبع قانون هوك .

مثال توضيحي 1-9

مكعب من اليورانيوم ($\rho = 18{,}680\ kg/m^3$) طول كل من أضلاعه 2.00 cm (أ) أوجد كتلته ، (ب) ما طول ضلع مكعب من الثلج ($\rho_i = 920\ kg/m^3$) له نفس الكتلة ؟

استدلال منطقي : (أ) من تعريف الكثافة ، $\rho = m/V$ ، نجد أن :

$$m_u = \rho_u V_u = (18.680\ kg/m^3)(8.00 \times 10^{-6}\ m^3 = 0.149\ kg$$

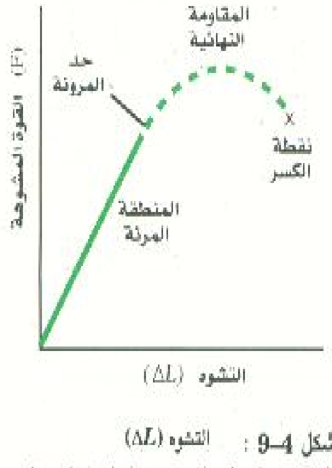
(ب) مرة أخرى ، من تعريف الكثافة :

$$V_i = \frac{m_i}{\rho_i} = \frac{0.149 \text{ kg}}{920 \text{ kg/m}^3} = 162 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

وبأخذ الجذر التكعيبى لهذا العدد نجد أن طول ضلع المكعب 5.45 m . ■

9-3 قانون هوك ، معاملات المرونة

يتميز كثير من الأجسام ، كالسلك الزنبركى أو القضيب المعدنى ، بخاصية تسمى **المرونة** ، فعندما يستطيل الجسم أو ينضغط تحت تأثير قوة مسلطة فإنه يميل إلى العودة إلى طوله الأصلى عند إزالة القوة . لنفرض مثلاً أن الزنبرك المبين بالشكل 3-9 طوله الأصلى L_0 وأنه قد استطال بمقدار ΔL تحت تأثير القوة المسلطة **F** . بدراسة هذا السلوك وجد روبرت هوك (1635 ـ 1703) أن الاستطالة تتضاعف مرتين إذا تضاعفت القوة المسلطة مرتين ، بشرط ألا تكون الاستطالة كبيرة جدًا ؛ أى أن $F \propto \Delta L$ عمومًا . وقد وضع هوك اكتشافاته هذه فى صورة قاعدة تعرف الآن **بقانون هوك** :

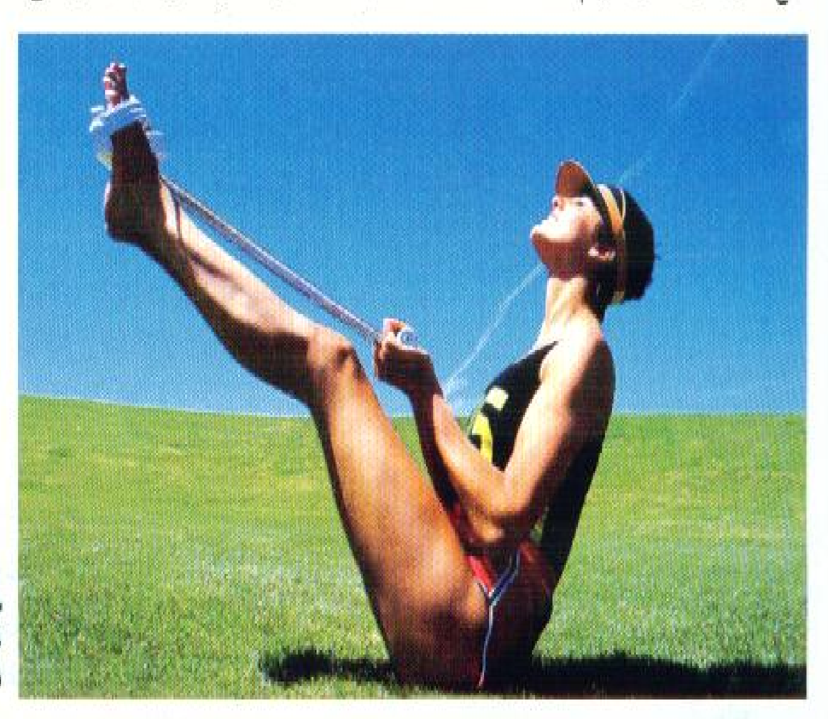


شكل 4-9 : التشوه (ΔL)
المنحنى النمطى للإجهاد مقابل الانفعال . ينطبق قانون هوك فى المنطقة المرنة فقط . تعرف أكبر قوة يمكن أن يتحملها الجسم المشوه بالمقاومة النهائية . عادة تخضع (تلين) المادة المرنة قبل الكسر بقليل .

عندما يمتد جسم مرن أو يتشوه بأى صورة أخرى فإن مقدار التشوه يتناسب خطيًا مع القوة المشوهة .

ولكن عند امتداد (استطالة) الزنبرك بمقدار كبير بحيث يتعدى ما يعرف بحد المرونة فإنه ينحرف عن هذا التناسب الطردى بين ΔL و F . وعلاوة على ذلك سنلاحظ أن الزنبرك لن يعود إلى طوله الأصلى عند إزالة القوة المسلطة .

وعند استبدال الزنبرك المبين بالشكل 3-9 بقضيب مصمت سنجد أيضًا أن القضيب يتبع قانون هوك . وبالرغم من أن الاستطالة النسبية للقضيب أصغر كثيرًا من قيمتها فى



سلوك الزنبركات طبقًا لقانون هوك يجعلها أجهزة ممتازة للتمارين الرياضية . كلما زادت الاستطالة تزيد قوة شدك للزنبرك .

حالة الزنبرك فإن القضيب يستطيل بانتظام بما يتفق مع قانون هوك ؛ ولكن قيم الاستطالة تكون أصغر مما فى حالة الزنبرك ؛ ويوضح الشكل 4-9 السلوك المشاهد عمليًا فى تجربة نموذجية من هذا النوع . لاحظ أن قانون هوك ينطبق فى المنطقة المرنة فقط ، وسوف يفترض فى المناقشة الآتية أن القوة والاستطالة صغيران بحيث لا يتعدى تشوه المادة حد مرونتها .

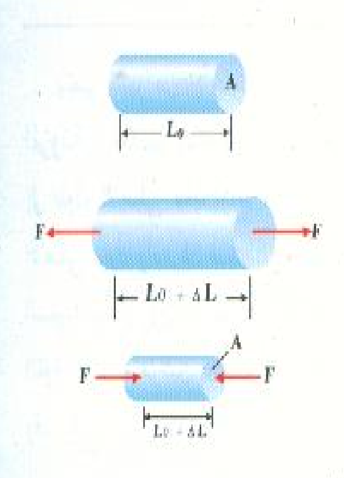
لاستخدام قانون هوك فى وصف الخواص المرنة للجوامد سوف نستخدم مصطلحين هامين هما **الإجهاد والانفعال** ، وسنقوم بتعريف هاتين الكميتين بمساعدة تجربة الاستطالة (**أو الشد**) المبينة بالشكل 5-9 . فى هذه التجربة تؤثر القوة الشادة (المطيلة) **F** عموديًا على المساحة الطرفية A لقضيب طوله الأصلى L_0 فيستطيل القضيب نتيجة لذلك بمقدار ΔL . يعرف الإجهاد الناتج عن **F** كالتالى :

$$\text{الإجهاد} = \frac{\text{القوة}}{\text{المساحة}} = \frac{F}{A} \qquad (9\text{-}3)$$

وحدات الإجهاد فى النظام SI هى النيوترون لكل متر مربع (N/m^2) .

ويعرف انفعال القضيب فى الشكل 5-9 كما يلى :

$$\text{التغير النسبى فى الطول} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{\text{الاستطالة}}{\text{الطول الأصلى}} = \text{الانفعال} \qquad (9\text{-}4)$$



شكل 5-9 :
إجهاد الشد وإجهاد الضغط فى حالة قضيب منتظم الإجهاد هو F/A والانفعال هو $\Delta L / L_0$

وقد عرف الانفعال بالنسبة $\Delta L / L_0$ ، بدلاً من ΔL ، لأن أى جسم مرن يستطيل بمقدار يتناسب طرديًا مع طوله الأصلى . وبقسمة ΔL على L_0 نكون قد تخلصنا من تأثير طول الجسم على الاستطالة ، وهو تأثير لا يمثل أى أهمية فيما يتعلق بخواص مادة القضيب ذاتها .

ونظرًا لأن الانفعال نسبة بين طولين فإنه كمية ليست لها وحدات . وسنرى مؤخرًا فى هذا القسم أن هناك أنواعًا أخرى من الانفعال ، وهذا يتوقف على الناحية الهندسية للموقف . أما فى هذه الحالة الحالية فإننا نتحدث عن انفعال شد . ولكن إذا ضغط القضيب فى اتجاه مواز لطوله فإن الانفعال ، طبقًا للتعريف ، سيكون أيضًا هو النسبة بين التغير فى الطول والطول الأصلى .

الآن يمكننا إعادة صياغة قانون هوك . ذلك أن الإجهاد مقياس للقوة المشوهة والانفعال مقياس للتشوه . وعليه يمكن كتابة قانون هوك على الصورة :

$$\text{الإجهاد} = (\text{ثابت})\,(\text{الانفعال}) \qquad (9\text{-}5)$$

وبهذه الصورة يمكن تطبيق قانون هوك على مواقف كثيرة تختلف عن استطالة القضيب ، وقد أثبتت تجارب هوك أن هذا القانون صالح للتطبيق فى حالات استطالة وانحناء وفى العديد من الزنبركات والأجسام الأخرى . وكما أوضحنا سابقًا فإن قانون هوك ينطبق طبعًا فى المنطقة المرنة من التشوهات فقط .

يعتمد ثابت التناسب فى المعادلة (5-9) على طبيعة المادة ونوع التشوه الذى تعانيه ،

وهو يعرف **بمعامل مرونة** المادة . إذن ، طبقًا للتعريف :

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}} \tag{9-6}$$

وحيث أن الانفعال كمية ليس لها وحدات ، فإن وحدات معامل المرونة هي نفس وحدات الإجهاد . لاحظ أن معامل المرونة يكون كبيرًا عندما يسبب الإجهاد الكبير انفعالاً صغيرًا فقط . **وعليه فإن معامل المرونة مقياس لجسوءة المادة** . وهناك ، في الواقع ، عدة أنواع من معاملات المرونة ، وهذا يتوقف على تفاصيل الطريقة التي تستطيل بها المادة أو تنحني أو تتشوه بأي طريقة أخرى من الطرق . لنناقش الآن أشهر هذه المعاملات وأكثرها استعمالاً .

معامل يونج

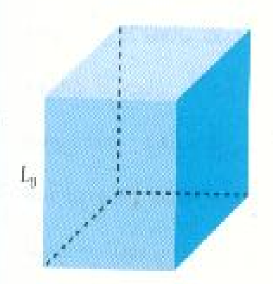
يعرف الإجهاد المؤثر عموديًا على مساحة معينة وفي بعد واحد ، كما بالشكل 5-9 ، **بالإجهاد الطولي** . وهذا النوع يمكن أن يكون إجهاد شد (يسبب استطالة الجسم) أو إجهاد تضاغط (يسبب تقصير الجسم) في بعد واحد . ويسمى معامل المرونة الذي يصف التغير النسبي في الطول في هذين الموقفين **بمعامل يونج** ، Y :

$$Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \tag{9-7}$$

جدول 3-9 : الخواص المرنة التقريبية .

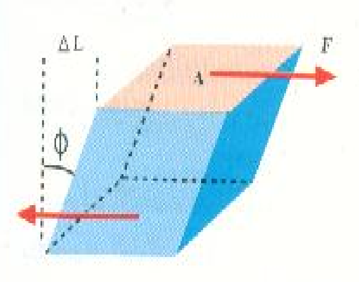
المادة	معامل يونج $(10^9\ N/m^2)$	معامل القص $(10^9\ N/m^2)$	معامل المرونة الحجمية $(10^9\ N/m^2)$	حد المرونة $(10^9\ N/m^2)$	مقاومة الشد $(10^9\ N/m^2)$
ألمنيوم	70	23	70	0.13	0.14
نحاس أصفر	90	36	60	0.35	0.45
نحاس	110	42	140	0.16	
زجاج	55	23	37		
حديد (مليف)	90	70	100	0.17	0.32
رصاص (مدلفن)	16	6	8		0.02
بولي ستيرين	1.4	0.5	5		0.05
مطاط	0.004	0.001	3		0.03
صلب	200	80	160	0.24	0.48
تنجستن	350	120	20		0.41
بنزين (عطري)			1.0		
زئبق			28		
ماء			2.2		
هواء			1×10^{-4}		

ويمثل الجدول 3-9 القيم النمطية للمعامل Y لبعض المواد ، لاحظ أيضا أن الجدول يحتوى على قيم حد المرونة ومقاومة الشد . وإذا زاد الإجهاد المسلط على المادة عن حد المرونة فإن المادة لن تعود إلى طولها الأصلى ، بل إنها سوف تحتفظ باستطالة دائمة إذا ما أزيل الإجهاد المؤثر عليها . كذلك فإن مقاومة الشد تعرف بأنها إجهاد الشد الذى يسبب كسر المادة .



معامل القص (المرونة القصية)

لنفرض أننا حاولنا تشويه مكعب من المادة بالطريقة الموضحة بالشكل 6-9 . فى هذه الحالة تسلط القوة فى اتجاه موازٍ للوجه العلوى للمكعب ، ومساحته A . نتيجة لتأثير هذه القوة يتحرك الوجهان العلوى والسفلى للمكعب فى اتجاهين متضادين متوازيين أحدهما مع الآخر ، وهذا ما يسمى **بالقص** . ويعرف **الإجهاد القصى** فى هذه الحالة بأنه F/A ، كما يعرف **الانفعال القصى** بالنسبة $\Delta L/L_0$ ، ولكن من الضرورة بمكان مراعاة الانتباه الشديد لطريقة تعريف هذه الرموز فى الشكل . فالطول L_0 هو سمك المادة مقاسًا على استقامة خط رأسى فى الشكل 6-9 ؛ وعند تسليط قوة القص سوف يتشوه هذا الخط الرأسى بزاوية مقدارها ϕ تسمى **زاوية القص** . أما ΔL فيمثل مقدار إزاحة إحدى نهايتى هذا الخط بالنسبة إلى موضعها الأصلى . وهكذا يمكننا أن نرى من الشكل 6-9 أن الانفعال القصى يصبح $\Delta L / L_0 = \tan\phi$. ومن التعريف العام لمعامل المرونة نجد أن **معامل المرونة القصية** ، S ، هو :



شكل 6-9 :
ΔL هنا مبالغ فى تكبيرها حتى يمكن رؤيتها . يعطى معامل المرونة الحجمية بالعلاقة :
$(F/A)/(\Delta L/L_0) = (F/A)/\tan\phi \simeq (F/A)\phi$

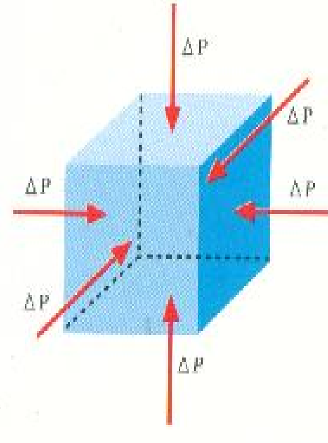
$$S = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F/A}{\tan\phi} \qquad (9\text{-}8)$$

وعندما تكون زاوية القص صغيرة (بضع درجات أو أقل) ، يمكن استخدام التقريب $\tan\phi = \phi$ ، وكتابة :

$$S = \frac{F/A}{\phi}$$

هذا ويتضمن الجدول 3-9 القيم النمطية للمعامل S لبعض المواد . ويلاحظ أن $S = 0$ للسوائل لأنها تنساب $(\Delta L/L_0)$ تحت تأثير القوى القاصة .

معامل الحجم (المرونة الحجمية)



شكل 7-9 :
مكعب حجمه الأصلى V_0 . تحت تأثير زيادة فى الضغط الخارجى قدرها ΔP سوف ينكمش المكعب بمقدار ΔV . تبين الأسهم اتجاه مركبات القوة المسببة لزيادة الضغط .

لنفرض أن قالبًا مكعبًا حجمه V_0 قد تعرض لزيادة فى الضغط على جميع أوجهه بمقدار ΔP (شكل 7-9) . عندئذ سيكون التغير فى حجم المكعب ΔV عددًا سالبًا لأن الحجم ينكمش . وفى هذه الحالة يعرف الانفعال بأنه $-\Delta V / V$ ، ويكون الإجهاد F/A هو الزيادة فى الضغط ΔP . وكما فى حالة الأنواع الأخرى من معاملات المرونة يعرف **معامل المرونة الحجمية** بأنه النسبة بين الإجهاد والانفعال* :

* أدخلت الإشارة السالبة لأن ΔV يكون سالبًا عندما يكون ΔP موجبًا .

$$\text{معامل المرونة الحجمية} = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V_0} \qquad (9\text{-}9)$$

الانضغاطية الحجمية

انضغاطية المادة k مقياس لقابلية المادة للانضغاط ، أى أن الانضغاطية هى مجرد مقلوب معامل المرونة الحجمية . وعادة تكتب معادلة تعريف الانضغاطية على الصورة :

$$-\frac{\Delta V}{V_0} = k\Delta P$$

يلاحظ أن وحدات الانضغاطية هى وحدات مقلوب الضغط . كذلك فإن انضغاطية السوائل عمومًا أكبر بكثير من انضغاطية الجوامد .

مثال 9-1 :

يتكون بندول معلق فى قاعة محاضرات كبيرة من كرة كتلتها 40 kg تتدلى من طرف سلك من الصلب طوله 15 m . (أ) ما هى مساحة مقطع السلك إذا كان الإجهاد المؤثر يساوى 10 فى المائة فقط من إجهاد الكسر ؟ (ب) ما مقدار الاستطالة التى تسببها الكرة فى السلك ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف يمكن معرفة إجهاد كسر الصلب ؟

الإجابة : إجهاد كسر المادة هو مقاومة شدها . بالرجوع إلى الجدول 3-9 نجد أن مقاومة شد الصلب هى : $0.48 \times 10^9\ \text{N/m}^2$.

سؤال : بماذا يتعين الإجهاد المؤثر على السلك ؟

الإجابة : كتلة الكرة 40 kg ، وعليه فإن وزنها يكون 390 N ، والإجهاد يساوى هذه القوة مقسومة على مساحة مقطع السلك .

سؤال : ما هى المعادلة اللازم استخدامها لتعيين مساحة مقطع السلك A ؟

الإجابة : $\dfrac{F}{A} = (0.10)(0.48 \times 10^9\ \text{N/m}^2)$

حيث $F = 390\ \text{N}$ ، والعامل 0.10 يمثل النسبة 10 فى المائة المذكورة بالمسألة .

سؤال : ما علاقة استطالة السلك بهذا الإجهاد المؤثر ؟

الإجابة : الاستطالة النسبية تعتمد على الإجهاد طبقًا لتعريف معامل يونج ($Y = 200 \times 10^9\ \text{N/m}^2$ للصلب) :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{F / A}{Y}$$

الحل والمناقشة : (أ) مساحة المقطع هى :

$$A = \frac{390\ \text{N}}{0.48 \times 10^8\ \text{N/m}^2} = 8.1 \times 10^{-6}\ \text{m}^2$$

وباستخدام العلاقة $A = \pi R^2$ نجد أن نصف قطر السلك $1.6\ nm$ تقريبًا .

(ب) التغير النسبى فى الطول هو :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0.48 \times 10^8\ \text{N/m}^2}{200 \times 10^9\ \text{N/m}^2}$$

$$= 2.4 \times 10^{-4}$$

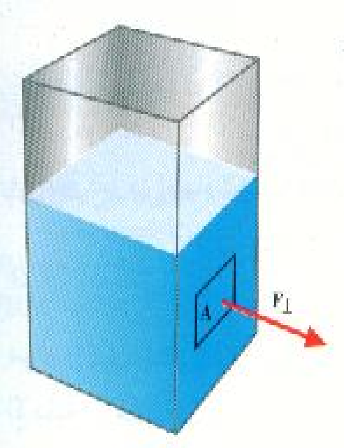
إذن :

$$\Delta L = (2.4 \times 10^{-4})(15\ \text{m}) = 3.6\ \text{mm}$$

تمرين : ما مقدار الإجهاد اللازم لكى يستطيل سلك من الألمنيوم بمقدار 0.020 فى المائة ؟

الإجابة : $1.4 \times 10^7\ \text{N/m}^2$

9-4 الضغط فى الموائع



شكل 9-8 :
متوسط الضغط على المساحة A يساوى $F_\perp / A$.

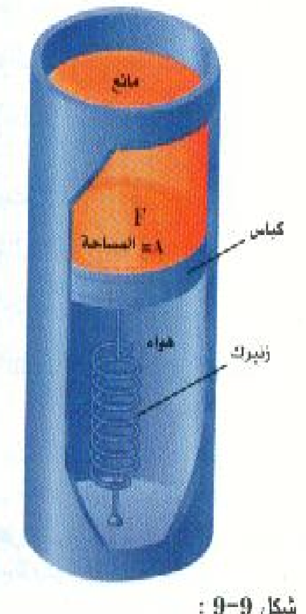
يمثل الشكل 9-8 سائلاً فى وعاء ؛ هذا المائع ساكن ، ويؤثر على جدران الوعاء بقوة معينة إلى الخارج . سنفترض أن القوة المؤثرة على المساحة A إلى الخارج هو $\mathbf{F}_\perp$ ، حيث ينبهنا الدليل السفلى أن القوة عمودية على جدار الوعاء . يعرف متوسط الضغط على المساحة A بالعلاقة :

$$\text{متوسط الضغط} = \overline{P} = \frac{F_\perp}{A} \qquad (9\text{-}10)$$

ومع أن الضغط كمية غير متجهة ، يجب أن نتذكر أن القوة المسببة للضغط نفسها لها اتجاه بالرغم من أننا نحذف الدليل السفلى عادة من القوة $\mathbf{F}_\perp$. ومن تعريف الضغط يمكننا أن نرى أن الوحدات SI للضغط هى نفس وحدات الإجهاد ؛ أى N/m^2 . وفى الحقيقة يعتبر الضغط مثالاً من أمثلة إجهاد التضاغط كما رأينا فى القسم السابق . ومع ذلك فإن الوحدة N/m^2 كوحدة ضغط تسمى عادة باسكال (Pa) . أى أن :

$$1\ \text{N/m}^2 = 1\ \text{Pa}$$

هذا وسوف نقابل وحدات كثيرة أخرى للضغط ، ربما أكثر من أى كمية فيزيائية أخرى . ولتلافى اللبس والخلط بين هذه الوحدات رأينا تلخيص الوحدات المستخدمة لقياس الضغط داخل غلاف هذا الكتاب .



شكل 9-9 :
جهاز بسيط لقياس الضغط .

يمكن استخدام الجهاز الموضح بالشكل 9-9 لقياس الضغط داخل أى مائع . وإذا كانت $\mathbf{F}$ هى القوة التى يؤثر بها المائع على الكباس فإن الكباس سوف يتحرك حتى تتعادل القوة المؤثرة بواسطة الزنبرك مع القوة الناتجة عن المائع ، وعند معايرة الجهاز بطريقة مناسبة يمكن استخدام إزاحة الكباس لقياس F . وإذا كانت A مساحة الكباس فإن الضغط سيكون ببساطة F/A . وبجعل مساحة الكباس صغيرة جدًا يمكننا الحصول

على قيمة الضغط على بعد صغير جدًا من أى نقطة داخل المائع ؛ هـذه الكمية هـى ما نقصده عند الحديث عن الضغط عند نقطة معينة ما داخل المائع .

لنناقش الآن عددًا من الحقائق الـهامة عن الضغط والقوى داخـل الموائـع ، وهـذه الحقائق تنطبق بـالتحديد علـى الموائع **غير القابلـة للانضغـاط** . هـذا يعنـى عمليًا أن الانضغاطية الحجمية لمثل هذه الموائع من الصغـر بحيث لا يسبب الضغـط أى تغيرات محسوبة فى الحجم . وعمليًا تعتبر السوائل موائع غير قابلة للانضغاط ، ولكن هذا غـير صحيح فى حالة الغازات .

1 ـ فـى مائـع ساكن ، تكون القوى المؤثرة بواسطة المائع عمودية دائمًا على الأسطح الملامسة للمائع بصرف النظر عن « اتجاه » هذه الأسطح .

طبقًا لقانون نيوتن الثالث يجب أن تكون القوى المؤثرة بواسـطة الـسطح علـى المـائع مساوية فى المقدار ومضادة فى الاتجاه لتلك القوى المؤثرة بواسطة المائع على السطح . هذا يعنى عدم وجود أى مركبة للقوة فى الاتجاه الموازى للسطح لأن المائع لا يمكـن أن يظل ساكنًا إذا وقع تحت تأثير القوى القاصة .

2 ـ فى المائل الساكن ، يجب أن يكون صافى القوى المؤثرة على أى عنصر حجمى صفرًا .

هذا ينتج مباشرة من قانون نيوتن الثانى . فإذا كان صافى القوى المؤثر على أى جزء من المائع لا يساوى صفرًا فإن المائع يجب ان ينساب تحت تأثير هـذه القـوة ، وهـذا يتعارض مع الفرض بأن المائع ساكن .

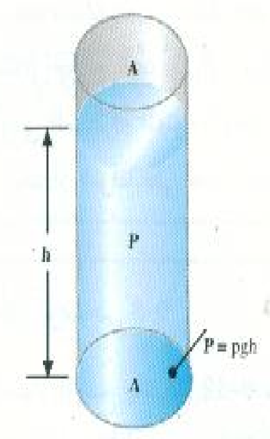
3 ـ الضغط الناتج عن وزن المائع عند أى نقطة تقع على عمق قدره h تحت سـطح مـائع كثافته ρ يساوى ρgh .

لإثبات أن $P = \rho gh$ يمكننا الاستعانة بالشكل 10-9 الذى يمثل مائعًا كثافته ρ فى وعاء أسطوانى الشكل . وزن المائع عند القاع ، أى على عمق قدره h تحت السطح هو :

$$\text{الوزن} = Mg = \rho Vg$$

حيث $M = \rho V$ عبارة عن كتلة عمود المائع . هذا الوزن موزع بانتظام علـى مساحة قـاع العمود A ، وعليه فإن الضغط عند القاع يكون :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\text{الوزن}}{A} = \frac{\rho Vg}{A}$$



شكل 10-9 : الضغط النـاتج عـن عمـود مـن المـائع $P = \rho gh$ على عمق h تحت السطح .

ولكن حجم المائع V يساوى حجم أسطوانة منتظمة قائمة مساحة مقطعها A وارتفاعها h ، أى أن $V = Ah$. إذن ، بالتعويض عـن V بـهذه الكميـة فـى المعادلـة الـسابق نجـد أن الضغط على عمق قدره h تحت سطح مائع نتيجة لوزن هذا المائع هو :

$$P = \frac{\rho Ahg}{A} = \rho gh \qquad (9\text{-}11)$$

4 ـ إذا سببت قوة خارجية ما زيادة في الضغط عند أي نقطة في مائع محبوس غير قابل للانضغاط فإن الضغط يزداد عند كل نقط المائع بنفس المقدار . وتعرف هذه الحقيقة باسم مبدأ باسكال .

فمثلاً ، إذا وضع مائع في وعاء مفتوح كما هو مبين بالشكل 10-9 سوف يقع السطح العلوي للمائع تحت تأثير الضغط الجوي P_a إلى أسفل ، وينص مبدأ باسكال على أن الضغط عند كل نقطة بالمائع يزداد بنفس هذا المقدار . يمكننا إذن القول أن الضغط الكلي على عمق h في المائع يعطى بالعلاقة :

$$P = P_a + \rho g h$$

عندما نستخدم مقياس الضغط لقياس الضغط داخل وعاء فإننا نفعل ذلك عادة بينما يحيط الضغط الجوي P_a بنا وبالمقياس في نفس الوقت . ما يقوم مقياس الضغط بقياسه هو في الواقع الفرق بين الضغط في الوعاء والضغط الجوي P_a . ويعرف هذا الفرق بين الضغط الكلي داخل الوعاء والضغط المحيط P_a **بمدلول مقياس الضغط** ، وسوف نرمز له بالرمز P_G . إذن :

$$P_G = P - P_a \qquad (9\text{–}12)$$

وعليه فإن مدلول مقياس الضغط على عمق h في مائع مفتوح على الجو هو :

$$P_G = P - P_a = \rho g h$$

هذا ويعتبر مبدأ باسكال الأساس النظري لعمل الروافع والمكابس الهيدروليكية وكذلك أنظمة الفرامل الهيدروليكية ، وسوف نتناول هنا بعض الأمثلة بالدراسة .

5 ـ يتساوى الضغط في مائع ساكن عند جميع النقط التي تقع على نفس العمق .

هذه نتيجة طبيعية طبقًا للعبارة 3 لأننا لم نحدد أي موضع أفقي معين في المائع عند اشتقاق العلاقة $P_G = \rho g h$. وبناء على ذلك فإن أسطح المائع الساكن في مجموعة من الأواني المستطرقة المفتوحة يجب أن تكون جميعها في نفس المستوى (شكل 11-9) .

بعد أن تعرفنا على هذه الحقائق الخمس يمكننا الانتقال إلى بعض التطبيقات .



شكل 11-9 :
عند اتزان سائل في مجموعة من الأواني المستطرقة المفتوحة تقع أسطح السائل في هذا الأواني على نفس المستوى .

مثال توضيحي 2-9

الجهاز الموضح بالشكل 12-9 نسخة من مكبس هيدروليكي . إذا أثرت قوة مقدارها F_1 على الكباس الأول (ومساحته A_1) فما مقدار القوة المؤثرة F_2 على الكباس الآخر (ومساحته A_2) واللازمة للاتزان مع F_1 ؟

استدلال منطقي :

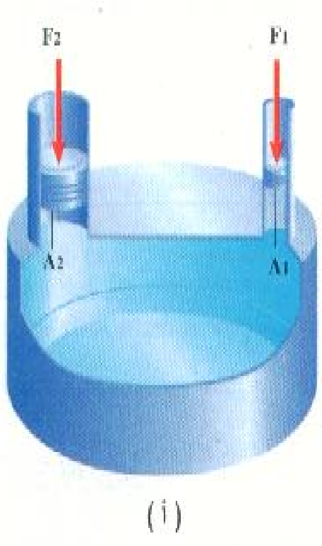
الضغط الناتج عن تأثير القوة F_1 على A_1 هو $P = F_1 / A_1$. وطبقًا لمبدأ باسكال فإن هذا

الضغط يؤثر في جميع نقط السائل ، بما فيها السطح A_2 . إذن ، الضغط عند الكباس الكبير يكون $P = F_1 / A_1$ ، ولهذا يمكن كتابة المعادلة الآتية :

$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1}$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى F_2 نحصل على :

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \qquad (9\text{–}13)$$



(أ)



(ب)

شكل 12–9 :
مبدأ المرفاع الهيدروليكي . (أ) تستطيع قوة صغيرة مؤثرة على الكباس الصغير رفع ثقل كبير على الكباس الكبير . (ب) يخلق الضغط في السائل الهيدروليكي باستعمال مضخة (غير ظاهرة في الصورة) . هذا الضغط ينتقل خلال الخطوط الهيدروليكية إلى الكباسات الشغالة . تضاعف الكباسات الهيدروليكية الكبيرة الضغط الناتج عن المضخة ، مما يمكن مخلب العزاقة من بذل قوى كبيرة جدا .

أى أن القوة المسلطة تتضاعف بمقدار النسبة بين المساحتين . ويعتبر المكبس الهيدروليكي أحد أمثلة الروافع ؛ والرافعة جهاز يمكننا من رفع أوزان كبيرة جدًا باستخدام قوى متوسطة القيمة .

من المهم أن نعي جيدًا أن مضاعفة القوة في الجهاز الهيدروليكي لا تعني بحال من الأحوال أن الجهاز يضاعف الشغل المبذول . هذا نقض صارخ لمبدأ بقاء الطاقة . ولكي نرى أن $W_{in} = W_{out}$ (بإهمال قوى الاحتكاك) سوف نبدأ باستخدام تعريف الشغل :

$$W_{out} = F_2 h_2 \qquad \text{و} \qquad W_{in} = F_1 h_1$$

حيث h_1 ، h_2 المسافاتان اللتان يقطعهما الكباسان . بناء على ذلك فإن النسبة بين مقداري الشغل هي :

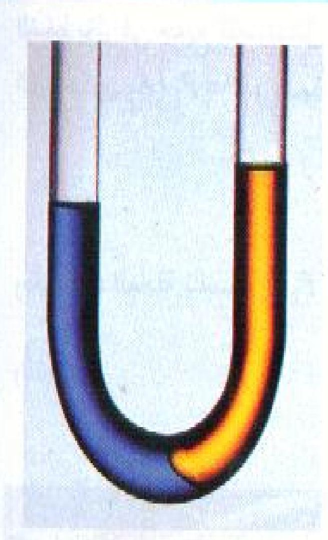
$$\frac{W_{in}}{W_{out}} = \frac{F_1 / F_2}{h_1 / h_2} = \frac{A_1}{A_2} \frac{h_1}{h_2} \qquad (9\text{–}14)$$

تذكر أن النسبة بين القوتين تعطى بالمعادلة (9-13) . والآن ما معنى **عدم القابلية للانضغاط (أو اللاانضغاطية)** ؟ معنى ذلك أن حجم أى عنصر من المائع لا يتغير ، فأى حجم من المائع يزيحه أحد الكباسين لابد أن ينتقل إلى الآخر . فإذا كان $V_1 = A_1h_1$ هو الحجم المزاح فى الكباس 1 وكان $V_2 = A_2h_2$ هو الحجم المزاح فى الكباس 2 فإن اللاانضغاطية تحتم أن يكون :

$$A_1h_1 = A_2h_2 \quad \text{أو} \quad \frac{A_2}{A_1} = \frac{h_2}{h_1}$$

وباستعمال هذا الشرط فى المعادلة 14-9 نجد أن :

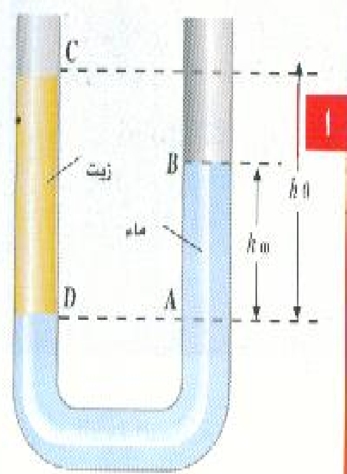
$$\frac{W_{in}}{W_{out}} = 1$$



اتزان الزيت (اللون البرتقالى) والماء (اللون الأرجوانى) فى أنبوبة على شكل الحرف U . ونظرًا لأن الزيت أقل كثافة من الماء ، يجب أن يكون طول عمود الزيت أكبر من طول عمود الماء ليكون ضغطاهما متساويين عند السطح الفاصل .

مثال 2-9 :

وضع الماء والزيت فى فرعى أنبوبة زجاجية على شكل الحرف U كما بالشكل 13-9 . إذا كان السائلان فى الشكل فى حالة سكون ، ما قيمة كثافة الزيت ؟



شكل 13-9 :
يمكن تعيين كثافة الزيت لأن الماء فى العمود BA متزن مع الزيت فى العمود CD .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو شرط اتزان السائلين ؟

الإجابة : النقطة الحاسمة هى السطح الفاصل بين الزيت والماء (النقطة D فى الشكل 13-9) . وإذا كان السائلان ساكنين فذلك يعنى أن القوة التى يؤثر بها الزيت على السطح الفاصل إلى أسفل تساوى القوى المؤثرة عليه بواسطة الماء إلى أعلى .

سؤال : هل يعنى هذا أن ضغطى السائلين أحدهما على الآخر متساويان عند السطح الفاصل ؟

الإجابة : الاتزان يعنى توازن القوتين . وحيث أن السائلين يشتركان فى نفس المساحة ، وحيث أن $P = F / A$ ، ينتج من ذلك أن الضغطين متساويان .

سؤال : ما تأثير الضغط الجوى ؟

الإجابة : كلا طرفى الأنبوبة مفتوحان ، ومن ثم فإن P_a يؤثر على كلا السائلين وتكون محصلة تأثير P_a على النظام صفرًا ، وهكذا فإن شرط الاتزان فى هذه الحالة هو تساوى مدلولى ضغط القياس عند D .

سؤال : ما قيمة الضغط عند D نتيجة للزيت ؟

الإجابة : مدلول ضغط القياس هو : $P_{oil} = \rho_{oil} g h_0$.

سؤال : ما قيمة الضغط عند D نتيجة للماء ؟

الإجابة : حيث أن D تقع على نفس مستوى A فإن ضغط الماء متساوى عند D و A . أى مدلول ضغط القياس يكون $P_w = \rho_w g h_w$.

الفيزيئيون يعملون : باتريك هاميل جامعة سان جوزيه الحكومية



بدأت دراستى فى الكلية كطالب بشعبة اللغة الإنجليزية ، فقد كان فى أعماقى إحساس غامض أننى سأكون كاتب أعظم رواية أمريكية أو ، على الأقل ، أنى سأحيا حياة بوهيمية فى غرفة علوية بسيطة فى باريس . حسنًا ، ولكن رائد الفصل أخبرنى أنه حتى طلاب اللغة الإنجليزية يتحتم عليهم دراسة أحد المقررات العلمية ، واقترح على مقرر الفيزياء 12 وهو مقرر مشهور بين الطلاب باسم « السكرى الدمية الثانى عشر » . ولأننى كنت طالبًا متميزًا إلى حد ما فى الرياضيات فقد اقترحت على الرائد أن يسجلنى فى مقرر أكثر تحديًا . وبابتسامة بغيضة رد الأستاذ قائلاً « بالتأكيد » وقام بتسجيلى فى مقرر الفيزياء لشعبتى الفيزياء والهندسة .

لا أدرى لماذا ، ولكننى استمتعت حقيقة بهذا المقرر . كان من بين ما أسرنى بصورة خاصة فى الفيزياء أن النظام الفيزيائى ، كالكرة المتدحرجة إلى أسفل على مستوى مائل ، يمكن وصفه بالمعادلات الرياضية ، وهذا ما يسمى « إعداد نموذج » للنظام الفيزيائى ، أو « نمذجة » النظام الفيزيائى . وفى الوقت الحالى يتطلب إعداد النموذج كتابة برنامج كومبيوتر معقد وتشغيله على كومبيوتر عملاق وليس مجرد استخدام الرياضيات فى حل عدد من المعادلات الرياضية البسيطة ، ولكن الفكرة واحدة . وأنا مازلت إلى الآن أعمل فى حقل إعداد النماذج لحساب الهيئة القومية للطيران والفضاء NASA • ؛ وهذه النماذج خاصة بتحليل ثقب الأوزون . كذلك فإنى أقوم بتدريس الفيزياء بجامعة سان جوزيه الحكومية ؛ حيث أدرس هذه المادة غالبًا لطلاب الفيزياء المستجدين – لنفس الفصل الذى بدأت أنا منه ، والذى يعتبر واحدًا من فصولى المفضلة .

ربما تعلم أن هناك طبقة من الهواء الغنى بالأوزون فى طبقات الجو العليا التى تقع على ارتفاع يتراوح بين 20 و 50 كيلو مترًا . هذه الطبقة تغطى الأرض كطبقة من السحب غير المرئية . وإذا نظرت إلى السماء فى يوم غائم فإنك ترى أحيانًا ثقبًا فى طبقة السحب تظهر السماء خلاله صافية . وعندما نظر العلماء إلى السماء فى القارة القطبية الجنوبية ولم يروا أوزونًا فوق رؤوسهم أطلقوا على هذه الظاهرة اسم « ثقب الأوزون » لتشابهه مع الثقب الموجود فى طبقة السحاب .

ولاكتشاف ثقب الأوزون قصة ممتعة . كانت الحكومة البريطانية تقدم الدعم المالى طوال عدة سنوات لمجموعة صغيرة من العلماء الذين يعسكرون فى منطقة قارسة البرد فى القارة القطبية الجنوبية لقياس كمية الأوزون فى الجو . وقد لاحظ هؤلاء العلماء ابتداء من حوالى عام 1975 سلوكًا غريبًا للأوزون فوق القارة القطبية الجنوبية ، إذا وجدوا أن كمية الأوزون فى كل أكتوبر أقل منها فى أكتوبر السابق ! هذا السلوك مستمر حتى الآن ، بل إن الأوزون يختفى الآن تمامًا فى أكتوبر على ارتفاعات معينة فوق القارة القطبية الجنوبية .

كان ثقب الأوزون لغزًا محيرًا يتطلب حله تضافر جهود الفيزيائيين وعلماء الظواهر الجوية وبعض المهندسين . لم يكن هذا لغزًا خياليًا فى فيلم بوليسى رخيص ، ولكنه لغز يهدد حياة البشرية ويجب حله . ويعتقد الكثيرون فى الحقيقة أن فهم ثقب الأوزون هو أهم مشكلة اجتماعية علمية تواجه المجتمع الصناعى حاليًا .

الأوزون هو جزئ يتكون من ثلاث ذرات من الأكسجين ، ورمزه الكيميائى O_3 . ويوجد الأكسجين فى الجو عادة على صورة الأكسجين الجزيئى O_2 . ولكن يحدث عند الارتفاعات العالية جدًا فى الغلاف الجوى أن يمتص O_2 الأشعة فوق البنفسجية

• National Aeronautics ans Space Adminstration

من ضوء الشمس ، وهذا يؤدى إلى كسر الرابطة بين ذرتى الأكسجين ، وعندئذ تتحد بعض ذرات الأكسجين المنفردة مع جزيئات الأكسجين لتتكون بذلك جزيئات الأوزون . وتتلخص أهمية الأوزون فى أنه يمتص الضوء فوق البنفسجى . والواقع أن أهميته فى هذا الشأن مزدوجة لأن امتصاص الضوء فوق البنفسجى يتم فى كلا عمليتى إنتاج وهدم الأوزون . ويوجد فى الواقع اتزان دقيق بين إنتاج وهدم الأوزون ، ولهذا فإن مستويات الضوء فوق البنفسجى على سطح الأرض محتملة تمامًا . وتتضح خطورة الضوء فوق البنفسجى على حياة الإنسان فى أنه يسبب اسمرار البشرة وأحيانًا حروق الشمس ، بل قد يسبب أيضًا سرطان الجلد . فإذا لم يكن الأوزون موجودًا سيصبح سطح الأرض كله مغمورًا فى حمام من الضوء فوق البنفسجى مما قد يودى بحياة الكائنات الحية جميعها . من الواضح إذن أن أى تغير عنيف فى طبقة الأوزون لابد أن يعالج باعتباره تهديدًا خطيرًا للبشرية .

كانت الأسئلة الأساسية فى موضوع ثقب الأوزون كما يأتى : لماذا يختفى الأوزون ؟ ولماذا فى القارة القطبية الجنوبية ؟ ولماذا فى أكتوبر فقط ؟ وسرعان ما أجيب عن السؤال الأول . الأوزون يختفى لأن الناس يطلقون المركبات الكلوروفلوركربونية (CFCs للاختصار) فى الجو . والواقع أن CFCs مركبات نافعة للغاية إذ يستخدم بعضها كسوائل وغازات تبريد فى الثلاجات ، وبعضها الآخر فى صناعة الأطباق والأكواب الرغوية ، كما يستخدم العديد منها فى العمليات الصناعية كصناعة رقائق الكومبيوتر . وتعتبر مركبات CFCs خاملة كيميائيًا ، ولكن الضوء فوق البنفسجى عند الارتفاعات العالية جدًا يسبب تكسيرها وتحرير ذرات الكلور . وقد اتضح أن الكلور قاتل للأوزون ، فذرة الكلور الواحدة يمكنها تدمير حوالى مليون من جزيئات الأوزون .

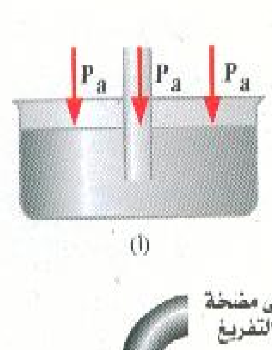
وهكذا فإن CFCs هى البطل الشرير فى لغز الأوزون . ولكن لماذا القارة القطبية الجنوبية ؟ حسنًا ، هنا يدخل بحثى فى الصورة ، لقد عملت لسنوات مع علماء NASA فى دراسة بيانات الأقمار الصناعية فلاحظنا ظاهرة هامة - لاحظنا ظهور ضباب أو سحاب غير كثيف كل شتاء على ارتفاعات عالية فوق القارة القطبية الجنوبية . (تذكر أن الشتاء فى القارة القطبية الجنوبية يكون فى يونيو ويوليو وأغسطس) . وكما قد تتوقع فإن درجة الحرارة على ارتفاع عشرين كيلو مترًا فوق القارة القطبية الجنوبية تكون منخفضة جدًا فى الشتاء ويمكن أن تصل إلى تسعين درجة مئوية تحت الصفر ، وهذه أبرد منطقة فى الجو . وكما أوضح صديقى بريان تون من NASA ، إن هذه المنطقة باردة بدرجة كافية لتكثيف حمض النيتريك من الجو وتكوين هذه السحب . سحب من حمض النيتريك ؟ كانت الفكرة مثيرة لدرجة أن NASA قررت إرسال طائرة أبحاث من طراز ER-2 محملة بالأجهزة إلى طرف أمريكا الجنوبية لتطير من هناك فوق القارة القطبية . وبالفعل ، كانت سحب حمض النيتريك موجودة هناك !

ولكن ما علاقة سحب حمض النيتريك باختفاء الأوزون فى أكتوبر ؟ الإجابة هى أن تلك السحب التى تتكون فقط فى الشتاء القطبى الجنوبى تمتص حمض النيتريك ، مغيرة بذلك تركيب الهواء من حولها . بعد ذلك تعمل هذه السحب كمصانع كيميائية دقيقة وتحول المواد الكلورية إلى فصائل نشطة تدمر الأوزون . وفى نهاية الأمر تسقط قطيرات حمض النيتريك إلى ارتفاعات أقل لتزيل المركبات النيتروجينية تاركة الجو فى حالة صالحة لحدوث إفراغ أوزونى . وبنهاية الليل الطويل بالقارة القطبية الجنوبية تبدأ الشمس فى السطوع على هذا الهواء « المعالج » ويبدأ الإفراغ الأوزونى ، وبحلول شهر أكتوبر لن يتبقى عمليًا أى أوزون فى المنطقة التى تكونت فيها السحب الاستراتوسفيرية القطبية .

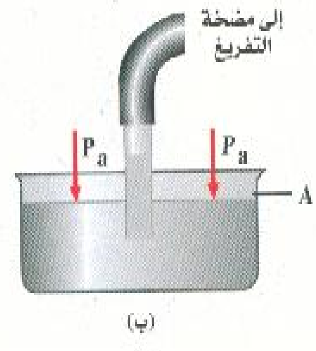
إن حل لغز كيفية تكون ثقب الأوزون لا يعنى أن المشكلة قد حلت ؛ فعلى الحكومات ورجال الصناعة وكافة المواطنين أن يتعاونوا من أجل بقاء طبقة الأوزون الحامية فى مكانها . ومع هذا فإن حل اللغز يمثل الخطوة الأولى الحاسمة فى هذا الاتجاه .

إن مجال أبحاثى فى منتهى الإثارة ؛ وأعتقد أنه لشىء عظيم أن يقوم الإنسان بعمل يمتعه هو شخصيًا ويمثل أهمية كبيرة للبشرية فى نفس الوقت . وإنى أظن الآن أن رائدى الدرسى الذى سجلنى فى مقرر الفيزياء « الصعب » قد فعل حقيقة معروفًا عظيمًا .

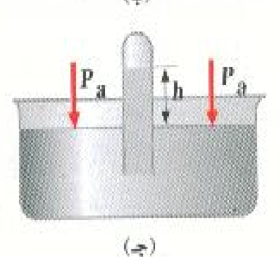
يستخدم **البارومتر** لقياس الضغط الجوى . وهناك أنواع عديدة من الأجهزة المستخدمة لهذا الغرض ، ولكن البارومتر الزئبقي هو أهم هذه الأجهزة على الإطلاق . ويمكننا فهم مبدأ عمل هذا الجهاز بالرجوع إلى الشكل 14–9 فى الجزء (أ) نرى أنبوبة مفتوحة وقد غمرت جزئيًا فى كأس من الزئبق . وحيث أن ضغط الهواء خارج الأنبوبة يساوى ضغط الهواء داخل الأنبوبة فإن مستوى الزئبق سيكون واحدًا داخلها وخارجها .



(أ)



(ب)



(جـ)

شكل 14–9 :
عند تفريغ الأنبوبة يرتفع الزئبق حتى يصبح $\rho gh = P_a$. وعليه فإن هذا الجهاز ، وهو بارومتر ، يستطيع قياس الضغط الجوى .

لنفرض الآن أننا استعملنا مضخة لتفريغ الهواء من الأنبوبة ، كما فى الشكل 14–9ب ، ثم قمنا بلحامها كما فى الجزء (جـ) . وما أن يضخ كل الهواء من الأنبوبة سيصبح الضغط على سطح الزئبق داخلها صفرًا . (تذكر أن ضغط الغاز على سطح ينشأ نتيجة لتصادم جزيئات الغاز مع السطح . وإذا لم توجد أى جزيئات من الهواء سيكون لدينا فراغ مثالى ويكون الضغط صفرًا) . وهكذا فإن الضغط على مستوى النقطة A داخل الأنبوبة يعزى فقط إلى ارتفاع عمود الزئبق h فى الأنبوبة ويساوى ρgh ، حيث ρ كثافة الزئبق . لاحظ أن الضغط على مستوى النقطة A خارج الأنبوبة ما زال هو الضغط الجوى P_a . علاوة على ذلك تفيدنا العبارة 5 بالقسم 4–9 أن الضغط داخل الأنبوبة على مستوى النقطة A يساوى نفس الضغط خارجها . إذن :



الضغط عند A داخل الأنبوبة = الضغط عند A خارج الأنبوبة

$$P_a = \rho gh \qquad (9\text{–}14)$$

نرى من ذلك أن الضغط الجوى يستطيع حمل عمود من الزئبق يعطى ارتفاعه بالمعادلة (15–9) . ولإيجاد طول عمود أى سائل يستطيع الجو أن يحمله يلزمنا فقط استخدام كثافة هذا السائل فى المعادلة (15–9) .

طول عمود الزئبق المناظر للضغط الجوى القياسي (لثلاثة أرقام معنوية) هو :

$$h = \frac{1.01325\times10^5\ \text{Pa}}{(13.6\times10^3\ \text{kg/m}^3)(9.80\ \text{m/s}^2)}$$

$$= 0.760\ \text{m} = 760\ \text{mm}$$

وهذا يساوى 29.9 in . وربما تكون قد سمعت فى تقارير الطقس أن الضغط البارومترى 30 in أو 670 mm تقريبًا .



عند تفريغ الهواء من علبة معدنية مغلقة يتسبب الضغط الجوى عليها من الخارج فى تدميرها .

يجدر بنا أن ننوه فى هذه النقطة إلى أن هناك وحدتين شائعتين لقياس الضغط . الأولى تسمى تور ، نسبة إلى مخترع البارومتر وهو الفيزيائى الإيطالى إيفانجليستا توريشيللى (1608–1647) . أما الوحدة الأخرى ، وهى البار ، فتستخدم فى علم الميتيورولوجيا (علم الظواهر الجوية) . وقيمة كل من هاتين الوحدتين كالتالى :

$$1\ \text{torr} = 1\ \text{mmHg} = (1/760)\ \text{atm}$$

$$1\ \text{bar} = 10^5\ \text{Pa}\ \ \text{(بالضبط)}$$

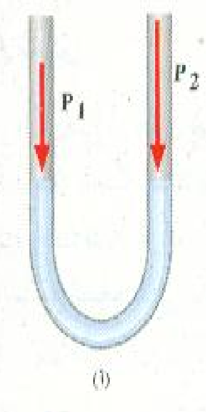
البار الواحد إذن يساوى الضغط الجوى النموذجى تقريبًا ، وتقاس التغيرات فى الضغط الجوى نتيجة للتقلبات الجوية عادة بالملى بارات .

تتميز البارومترات التجارية بكونها أكثر تهذيبًا من الجهاز البسيط الموضح بالشكل 15-9 ، فهي مزودة بتدريج دقيق بجانب عمود الزئبق وأجهزة خاصة لتعديل مستوى الزئبق بالكأس . هناك كذلك أنواع أخرى من البارومترات المصممة على أساس مبادئ مختلفة ، ولكن البارومترات الزئبقية تفضل دائمًا في القياسات الدقيقة . ومع ذلك فإن طول الجهاز يجب أن يكون 76 cm على الأقل (لماذا ؟) ، ولكن قد تدعو الحاجة إلى استبداله بجهاز أصغر ، ولكنه أقل دقة .

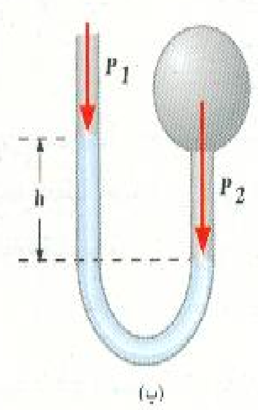
هناك جهاز آخر يستخدم كثيرًا لقياس ضغوط الغازات وهو **المانومتر** (شكل 15-9) هذا الجهاز يوجد في صور عديدة ، ولكن المانومتر يتكون أساسًا من أنبوبة على شكل الحرف U مملوءة جزيئًا بسائل ما ، وهو الزئبق غالبًا . وعندما يكون مستوى سطح الزئبق في فرعي الأنبوبة واحدًا ، كما هو مبين بالجزء (أ) من الشكل ، فهذا يعني أن ضغطي الغازين P_1 و P_2 فوق العمودين متساويان . أما إذا كان P_2 أكبر من P_1 فسيكون الوضع كما هو مبين بالجزء (ب) من الشكل .

وهكذا فإن الفرق بين الارتفاعين h ، مقاسات بالمليمترات ، يعطينا فوق الضغط $P_2 - P_1$ بالتور مباشرة طالما كان الزئبق هو السائل المستخدم . وعندما يكون العمود 1 مفتوحًا على الجو فسوف يمثل القياس مدلول ضغط المقياس في الفرع 2 . وطبقًا لتعريف h كما هو مبين بالشكل 15-9(ب) ، عندما يكون P_2 أقل من P_1 فإن h سيكون سالبًا . وعليه فإذا كان مدلول ضغط المقياس سالبًا فإن هذا يعني أن الضغط في الوعاء أقل من الضغط الجوي المحيط .

لقياس فروق صغيرة في الضغط يجب استعمال سائل أقل كثافة من الزئبق ، وعندئذ سوف يزداد الارتفاعان بنسبة قدرها $13,600 / \rho$ ، حيث ρ كثافة السائل المستخدم بدلاً من الزئبق مقدرة بالوحدات SI . لاحظ أنه إذا استخدم الماء كسائل مانومتري لقياس الضغط الجوي P_a فإن طول عمود الماء سيكون عندئذ $(76\ \text{cm})(13,600/1000) = 1034\ \text{cm}$ تقريبًا ، وهو بالتقريب ارتفاع مبنى من ثلاثة طوابق .

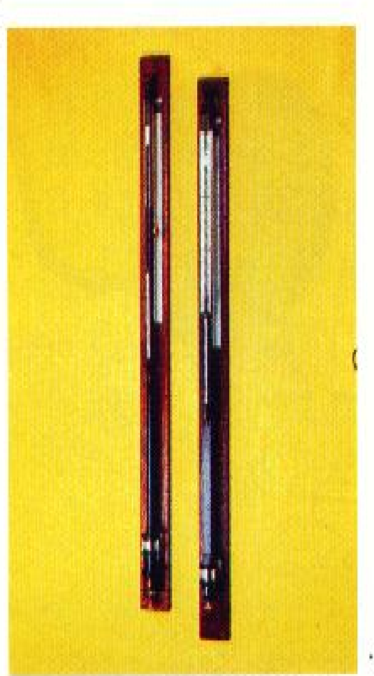


(أ)



(ب)

شكل 15-9 : (ب)
يقاس فرق الضغط $P_2 - P_1$ بدلالة الفرق بين الارتفاعين h في فرعي المانومتر .



مانومتر زئبقي .

مثال 3-9 :

فى أحد الاختبارات البسيطة للرئتين يطلب من الشخص أن ينفخ بكل قوتـه فـى أحـد فرعي مانومتر كما هو مبين بالشكل 16-9 . لنفرض أن مانومترًا مائيًا قد استخدم فى هذه الحالة فكان الفرق بين مستويى الزئبق 80.0 cm كما بالشكل . مـا قيمـة الضغـط داخـل الرئتين ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا يعنى أن الفرق بين مستويى الماء 80.0 cm ؟

الإجابة : هذا القيمة تمكننا من حساب مدلول ضغط المقياس ؛ $P_G = \rho gh$ ، حيث ρ كثافة الماء و $h = 80.0$ cm .

سؤال : ما هو الضغط الكلى داخل الرئتين ؟

الإجابة : $P_{tot} = P_G + P_{atm}$ ، ونحتاج إلى معرفة قيمة الضغط الجوى المحيط لحساب P_{tot} . فإذا فرضنا أن هذا الضغط يساوى 1 atm ؛ فإن :

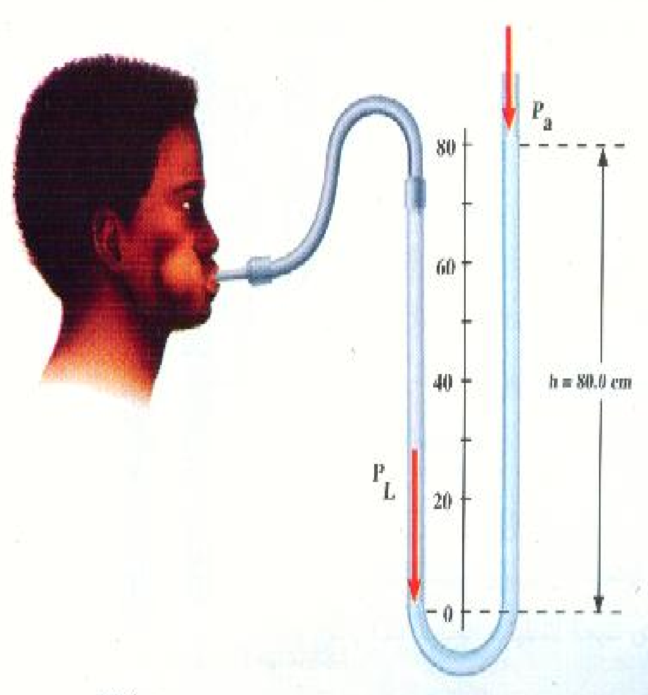
$$P_{tot} = P_G + 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

الحل والمناقشة : يجب أن نفهم أن P_{atm} لا يساوى دائمًا 1 atm . وعليه يجب قيـاس القيمة الفعلية للضغط P_{atm} فى الغرفة التى تجرى بها التجربة فى كـل حالـة . مدلـول ضغط المقياس هو :

$$P_G = (1.00 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)(9.80 \text{ m/s}^2)(0.800 \text{ m}) = 7.84 \times 10^3 \text{ Pa}$$

وعليه ؛ فإن الضغط الكلى يكون :

$$P_{tot} = (101 + 7.84) \times 10^3 \text{ Pa} = 109 \times 10^3 \text{ Pa}$$



شكل 16-9 :
يستطيع الشخص أن يتحمل عمودًا من السائل ارتفاعه 80.0 cm . ما قيمة P_L ؟

تمرين : مانومتر يستخدم فيه الزيت ($\rho = 840\ kg/m^3$) كسائل مانومترى يقرأ فرقًا بين مستويى الزيت فى فرعيه مقداره 7.31 cm . ما قيمة هذا الفرق بالوحدات SI وبالسنتيمترات من الزئبق ؟ **الإجابة** : 4.53×10^{-4} cmHg ، $0.602\ Pa$

مثال 9-4 :

غاص هلب من الصلب المصمت إلى قاع واحد من أعمق الأخاديد فى المحيط إلى عمق قدره 6.90 mi تحت السطح . احسب التغير فى كثافة الهلب المصنوع من الصلب نتيجة لضغط الماء .

استدلال منطقى :

سؤال : لماذا تتأثر الكثافة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : الكثافة = الكتلة / الحجم . وكتلة الهلب تظل ثابتة ، ولكن الحجم سوف يقل بسبب ضغط الماء .

سؤال : ما الذى يربط التغير فى الحجم بالضغط المؤثر ؟

الإجابة : معامل المرونة الحجمية للصلب : $\Delta V/V_0 = -\Delta P/B$.

سؤال : ما قيمة ΔP فى هذه الحالة ؟

الإجابة : ΔP يمثل الفرق بين الضغط الجوى على الهلب عند مستوى سطح البحر والضغط الكلى عليه فى قاع المحيط . بأسلوب آخر ، ΔP هو مدلول ضغط المقياس $\rho g h$ الناتج على عمق h قدره 6.9 mi من ماء البحر .

سؤال : بعد إيجاد $\Delta V/V$ ، كيف يمكن ربطه بالتغير فى الكثافة $\Delta\rho$ ؟

الإجابة : بفرض أن كتلة الهلب m يمكن كتابة الكثافة الأصلية على الصورة $\rho_0 = m/V_0$. وبذلك تكون الكثافة عند وجول الهلب تحت الماء $\rho = m/V$ ، حيث $\Delta V = V - V_0$.

الحل والمناقشة : مدلول ضغط المقياس المناظر لعمق قدره 6.90 mi من ماء البحر هو :

$$P_G = (1.025 \times 10^3\ kg/m^3)(9.80\ m/s^2)(6.90\ mi)(1610\ m/mi)$$

$$= 1.12 \times 10^8\ Pa = 1100\ atm$$

معامل المرونة الحجمية للصلب يساوى $16 \times 10^{10}\ N/m^2$. ومن ثم فإن التغير فى الحجم الناتج عن زيادة الضغط بمقدار مدلول ضغط المقياس يعطى بالعلاقة :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{-\Delta P}{B} = \frac{-(1.12 \times 10^8\ Pa)}{16 \times 10^{10}\ N/m^2}$$

$$= -7.00 \times 10^{-4}$$

لاحظ أن P_a تختصر مع N/m^2 . إذن ، الحجم الجديد يكون :

$$V = (1.0000 - 0.0007)V_0 = 0.9993\, V_0$$

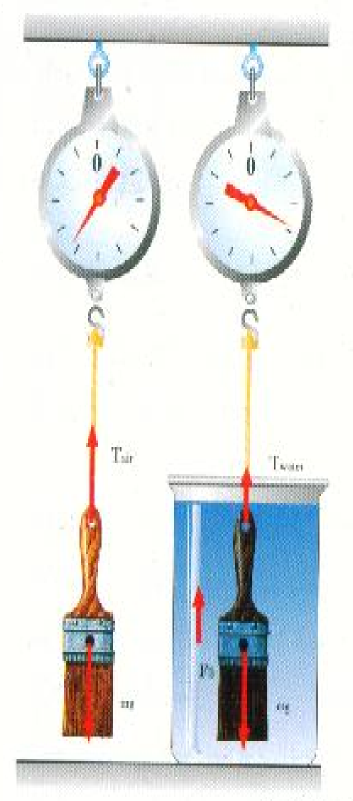
وبذلك تكون الكثافة الجديد هي :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{0.9993V_0} = \frac{\rho_0}{0.9993} = 1.0007\rho_0$$

أى أن هذه الزيادة فى الضغط تسبب زيادة الكثافة بمقدار 0.07 فى المائة فقط .

9-6 مبدأ أرشميدس ؛ الطفو

ربما تكون التجربة الموضحة بالشكل 17-9 جديدة بالنسبة إليك ، وهى توضح الحقيقة المشهورة بأن الأجسام تبدو أقل وزنًا عندما تكون مغمورة فى سائل . وإذا كنت قد حاولت مرة أن تحمل شخصًا فى حمام سباحة فإنك تعلم تمامًا أن القوة اللازمة لحمله أقل كثيرًا من وزنه . وبالمثل فإن القوة الحاملة T فى الشكل 17-9 تكون أقل عندما تكون الفرشة مغمورة فى الماء . يبدو إذن أن الماء يؤثر على الفرشة بقوة معينة F_B إلى أعلى ، وسوف نسمى هذه القوة **بقوة الطفو** .



شكل 17-9 :
يؤثر الماء على الفرشة بقوة الطفو F_B إلى أعلى . ويقرأ الميزان T_{air} عندما تكون الفرشة فى الهواء ويقرأ T_{water} عندما تكون فى الماء .

يعرف قانون الموائع الذى يصف قوة الطفو باسم **مبدأ أرشميدس** . وللوصول إلى هذا القانون لنتأمل الجسم الموضح بالشكل 18-9 . هذا الجسم يقع تحت تأثير قوة الطفو التى يؤثر بها السائل على الجسم . ومن الواضح أن محصلة تأثير قوى السائل المؤثرة على الجسم تتمثل فى قوة إلى أعلى مقدارها F_B . وتعتبر F_B أساسًا نتيجة منطقية لحقيقة أن الضغط يزداد مع العمق ، بحيث تكون القوة المؤثرة إلى أعلى على قاع الجسم أكبر من القوة المؤثرة إلى أسفل على قاع الجسم .

ولكى ترى مدى كبر قوة الطفو ، لاحظ ما يمكن أن يحدث إذا كان الجسم مصنوعًا من نفس مادة السائل ؛ وفى هذه الحالة لن يمكن تمييز الجسم عن السائل . وهكذا سوف يظل الجسم ساكنًا دون الحاجة إلى أى قوى لحمله . هذا يعنى أن مقدار F_B تكفى بالضبط لحمل الجسم فى هذه الحالة ، أى أن $F_B = mg$ ، حيث mg وزن الجسم المصنوع من السائل .

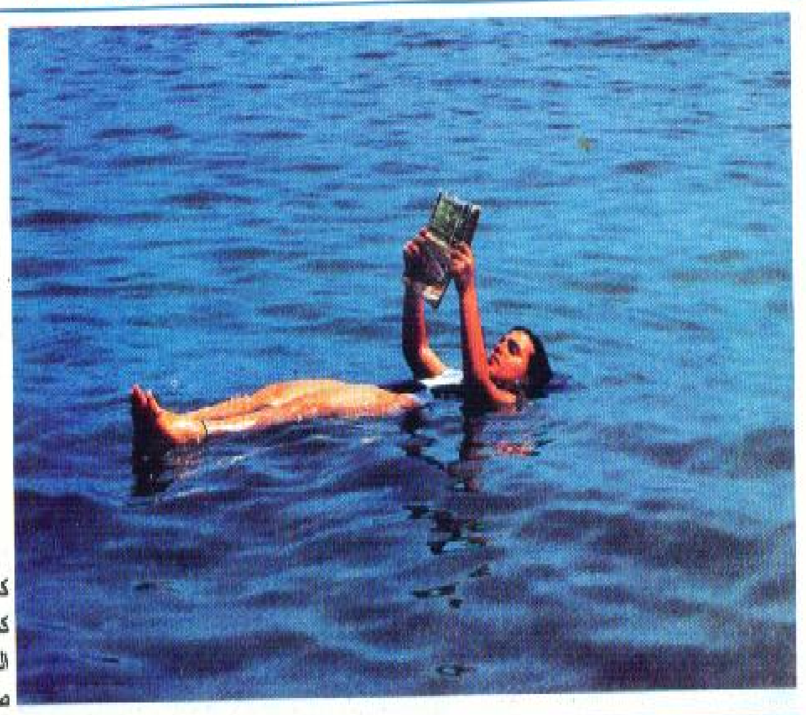
من الطبيعى ألا تعتمد قوة الطفو الناتجة عن السائل على مادة الجسم . وعليه فإن F_B تكون ثابتة دائمًا وتساوى وزن ذلك الحجم من السائل الذى يزيحه الجسم . بهذا نكون قد وصلنا إلى صيغة مبدأ أرشميدس :

إذا غمر جسم جزيئًا أو كليًا فى مائع فإنه يُدفع رأسيًا إلى أعلى بقوة تساوى وزن المائع الذى يزيحه الجسم .



شكل 18-9 :
بملذا يخبرنا مبدأ أرشميدس عن قوة الطفو المؤثرة على الجسم ؟

ويمكنك باتباع نفس هذا الأسلوب فى الاستدلال المنطقى أن ترى بنفسك أننا لم نستعمل حقيقة أن الجسم المبين بالشكل 18-9 مغمور كليًا .



كثافة الماء المالح فى البحر الميت أكبر من كثافة الماء العذب . ونتيجة لذلك تطفو السباحة على سطح الماء المالح مع أن جزءًا صغيرًا من جسمها فقط هو المغمور فيه .

مثال 5-9 :

افترض أن M هى كتلة الفرشة المبينة بالشكل 17-9 وأن ρ كثافتها . أوجد وزنها الظاهرى (قراءة الميزان الأيمن W_{app}) عندما تكون مغمورة فى سائل كثافته ρ_f .

استدلال منطقى :

سؤال : ماذ تقيس قراءة الميزان ؟

الإجابة : إنها تقيس صافى القوة المؤثرة على الفرشة إلى أسفل ، وهو يمثل الفرق بين قوة الجاذبية إلى أسفل وقوة الطفو F_B إلى أعلى :

$$W_{app} = M_b\, g - F_B$$

الدليل السفلى b يعود على خواص الفرشة .

سؤال : على ماذا تعتمد F_B ؟

الإجابة : الفرشة مغمورة كليًا ، ومن ثم فإن F_B تساوى وزن السائل المزاح بواسطة حجم الفرشة كله .

سؤال : ما مقدار حجم الفرشة ؟

الإجابة : من تعريف الكثافة ، $V_b = M_b / \rho_b$. هذا يساوى أيضًا حجم السائل المزاح .

سؤال : ما وزن هذا الحجم من السائل ؟

الإجابة : $W_f = M_f g = \rho_f V_f g = \rho_f V_b g = F_B$

الحل والمناقشة : باستعمال كل هذه الأجزاء وكذلك العلاقة $M_b g = \rho_b V_b g$ نحصل على :

$$W_{app} = \rho_b V_b g - \rho_f V_f g = (\rho_b - \rho_f) V_b g$$

لاحظ ما يأتي :

1 ـ إذا كانت $\rho_f > \rho_b$ فإن صافي القوة يكون إلى أسفل ، وإذا حررت الفرشة فسوف تغوص في السائل .

2 ـ إذا كانت $\rho_f < \rho_b$ فإن صافي القوة يكون إلى أعلى ، وسوف ترتفع الفرشة خلال السائل إذا حررت .

3 ـ إذا كانت $\rho_f = \rho_b$ سيكون طفو الفرشة المغمورة **متعادلاً** ، ولن تغوص أو ترتفع .

مثال 9-6 :

كتلة تاج إحدى الملكات 1.30 kg . ولكن عند وزنه وهو مغمور كلية في الماء وجد أن كتلته الظاهرية 1.14 kg . هل التاج من الذهب المصمت ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما المفتاح لمعرفة ما إذا كان التاج من الذهب المصمت ؟

الإجابة : إذا كان التاج من الذهب المصمت فإن كثافته تساوي كثافة الذهب . أما إن كان مصنوعاً من خليط من المواد أو من مادة أخرى متجانسة أو كان مجوفاً فإن كثافته تكون مختلفة عن كثافة الذهب .

سؤال : كيف يمكن حساب الكثافة بدون قياس حجم التاج .

الإجابة : بتطبيق مبدأ أرشميدس واستعمال البيانات المعطاة . هذا ما فعلناه في المثال 9-5 . وبإعادة ترتيب نتيجة ذلك المثال سنحصل على :

$$W_{app} = W_c \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_c}\right)$$

حيث ρ_c كثافة التاج ، W_c وزن التاج في الهواء .

سؤال : ما وزن التاج في الهواء ؟

الإجابة : $W_c = Mg = (1.30\ kg)(9.80\ m/s^2) = 12.7\ N$

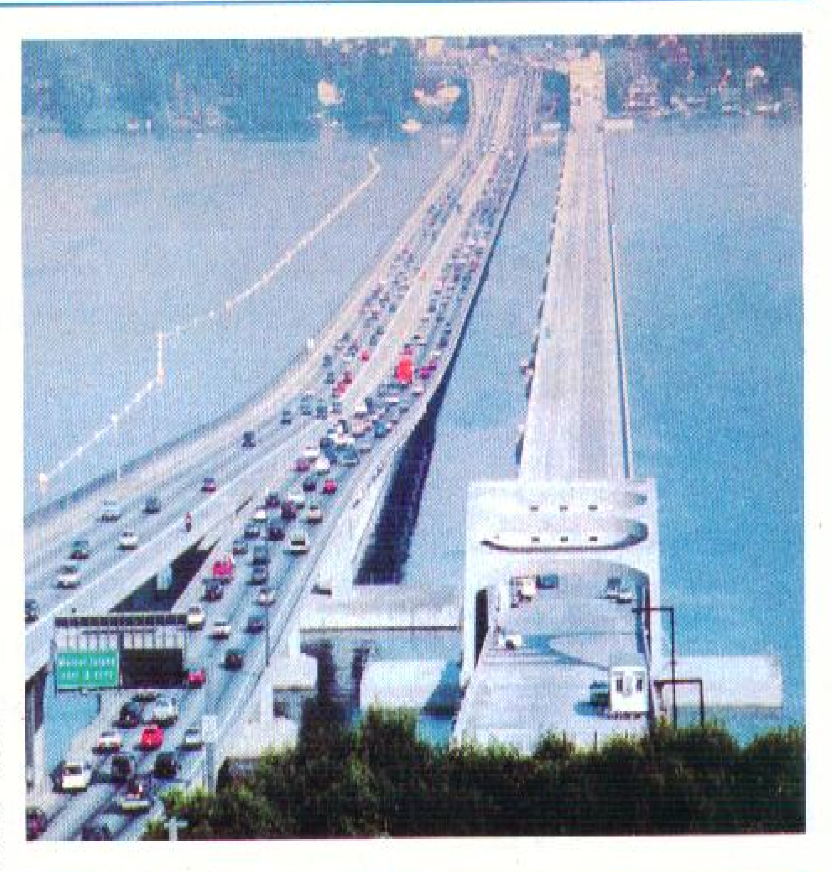
الحل والمناقشة : يمكن حل المعادلة السابقة بالنسبة إلى ρ_c :

$$\rho_c = \frac{\rho_f W_c}{W_c - W_{app}}$$

وبالتعويض بالقيم العددية للوزنين وكثافة الماء نجد أن :

$$\rho_c = \frac{(1.00 \times 10^3\ kg/m^3)(12.7\ N)}{12.7\ N - (1.14\ kg)(9.80\ m/s^2)} = 8.31 \times 10^3\ kg/m^3$$

ولكن كثافة الذهب أكبر كثيراً من هذه القيمة ، $19.3 \times 10^3\ kg/m^3$. إذن ، التاج بالتأكيد ليس مصنوعاً من الذهب المصمت .



الخرسانة أكبر كثافة من الماء ، ومع هذا فإن هذه الكبارى الخرسانية تطفو وتحمل وزن كثير من السيارات . هل يمكنك تفسير ذلك ؟

مثال 7-9 :

الثلج يطفو على الماء لأن كثافته $0.92 \times 10^3\ kg/m^3$. ما هى النسبة الحجمية المغمورة تحت سطح الماء من قطعة ثلج طافية ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الشرط الفيزيائى الذى يصف الطفو ؟

الإجابة : يقع الجسم الطافى تحت تأثير قوة تساوى وزنه ، ولهذا يظل الجسم فى حالة اتزان على سطح السائل .

سؤال : ما هى المعادلة التى تعبر عن هذا الشرط ؟

الإجابة : $F_B = Mg$ ، حيث F_B وزن الماء المزاح ، M كتلة الجسم الطافى .

سؤال : ما حجم الماء المزاح ؟

الإجابة : هذا الحجم يساوى حجم الجزء المغمور (وليس الحجم الكلى) من قطعة الثلج . لنرمز لهذا الحجم بالحرف V .

الحل والمناقشة : عند التعويض عن F_B بالكمية $\rho_w V_s g$ وعن M_{ice} بالكمية $\rho_{ice} V_{ice}$ تتحول معادلة الطفو إلى الصورة :

$$\rho_w V_s g = \rho_{ice} V_{ice} g$$

ومن ثم فإن النسبة الحجمية المغمورة من الجسم هى :

$$\frac{V_s}{V_{ice}} = \frac{\rho_{ice}}{\rho_w} = \frac{0.92}{1.00} = 92\ \%$$

حقيقة إذن أننا نرى فقط قمة الجبل الجليدى .

9-7 اللزوجة وانسياب السوائل

عسل النحل والمولاس (العسل الأسود) مثالان لما يسمى **بالسوائل اللزجة جدًا** ، فهى تنساب ببطئ شديد عند صبها من إناء . أما الماء والكحول ، وهى سوائل أقل لزوجة بدرجة كبيرة ، فتنساب بحرية تامة . وتعرف خاصية مقاومة السوائل (والموائع عمومًا) **باللزوجة** . ولكى نحصل على معنى كمى للزوجة سنستعين بتجربة القص الموضحة بالشكل 19-9 . نحن نرى فى هذا الشكل لوحين متوازيين مساحة كل منهما A تفصلهما مسافة قدرها L ؛ ولنفرض أن المنطقة بين اللوحين مملوءة بسائل سنرمز للزوجية بالرمز η (الحرف اليونانى ايتا) . عندما تؤثر القوة الماسية F على اللوح العلوى سوف يتحرك هذا اللوح بسرعة معينة ولتكن v بالنسبة إلى اللوح السفلى ، وبالطبع فإن القوة اللازمة لتحريك اللوح العلوى بهذه السرعة ستكون كبيرة كلما السائل أكثر لزوجة . ويمكن وصف سرعة هذه الحركة القصية بما يسمى **معدل القص** للوحين والسائل الموجود بينهما :

$$\frac{v}{L} = \frac{\text{مقدار سرعة اللوح العلوى بالنسبة إلى السفلى}}{\text{المسافة بين اللوحين}} = \text{معدل القص}$$

وهكذا فإن الإجهاد القصى F/A المؤثر على اللوح العلوى يسبب معدل قص قدره v/L فى السائل .

تعرف لزوجة السائل η بأنها النسبة بين الإجهاد القصى ومعدل القص :

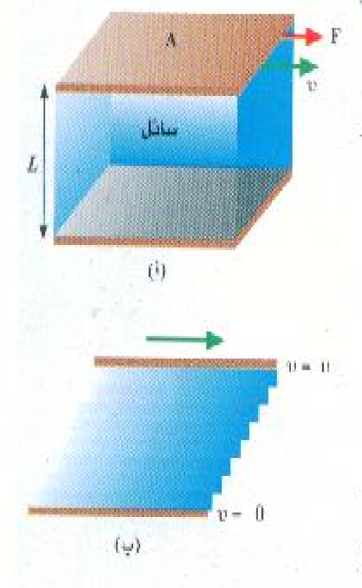
$$\eta = \text{اللزوجة} = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} \qquad \text{(9-16أ)}$$

وكما نرى فإن السائل الأكثر لزوجة يحتاج إلى إجهاد قصى أكبر لكى ينساب بمعدل قص معين .

وبدلالة التجربة الموضحة بالشكل 19-9 يمكننا أن نرى أن الإجهاد القصى يساوى F/A وأن معدل القص يساوى v/L . وباستخدام هذه الكميات المقاسة يمكن حساب لزوجة السائل :

$$\eta = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} = \frac{F/A}{v/L} \qquad \text{(9-16ب)}$$

يمكننا أن نرى من معادلة التعريف أن الوحدات SI للزوجة هى الباسكال . ثانية (Pa . s) ؛



شكل 19-9 :
عندما يتحرك اللوح العلوى تنزلق طبقات السائل فوق بعضها البعض . وتنشأ فواقد الطاقة اللزجة بسبب قوى الاحتكاك المعوقة لحركة هذه الطبقات .

جدول 4-9 : لزوجة بعض السوائل والغازات عند 30°C

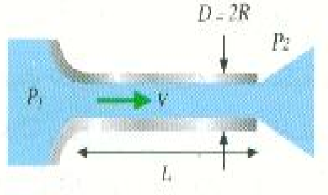
المادة	اللزوجة (mPl) *
هواء	0.019
أسيتون	0.295
ميثانول (كحول ميثيلى)	0.510
بنزين عطرى	0.564
ماء	0.801
إيثانول(كحول إيثيلى)	1.00
بلازما الدم	~1.6
الزيت SAE رقم 10	200
جلسرين	629
جلوكوز	6.6×10^{13}

* 1 mPl = 10^{-3} Pa.s = 1 cP

وقد أطلق اسم خاص لهذه الوحدة هو البوازيل (Pl) . ومن الوحدات الأخرى الشائعة الاستعمال لقياس اللزوجة نذكر البويز (P) ، حيث $1 P = 0.10 Pl$ ؛ وسنتيبواز (cP) . هذه الوحدة الأخيرة يمكن تذكرها بسهولة لأنها تساوى ملى بوازيل واحد : $1 cP = 1 mPl$. هذا ويتضمن الجدول 4-9 القيم النمطية للزوجة بعض السوائل .

يمكننا التعرف على معنى اللزوجة بصورة أكثر عمقًا بفحص الشكل 19-9ب . لاحظ أن طبقتى السائل الملامستين للوحين تظلان ملتصقتين بهما . علاوة على ذلك يمكننا اعتبار أن السائل الموجود بين اللوحين مكون من عدد كبير من الطبقات الرقيقة ، أكثر كثيرًا مما هو مبين بالشكل . وعندما يتحرك اللوح العلوى تنزلق هذه الطبقات كل منها على الأخرى ، ويكون الانزلاق أكثر صعوبة إذا كانت لزوجة السائل كبيرة ؛ وفى هذه الحالة تكون كمية الشغل اللازمة لحدوث القص فى السائل كبيرة .

يمثل انسياب الماء وغيره من السوائل الشبيهة به فى الأنابيب أو المواسير أهمية عملية خاصة ، وهذا ما سوف نراه فيما بعد . ولمناقشة الانسياب فى مثل هذه الأنابيب سوف نعرف **معدل الانسياب** بأنه حجم السائل Q المنساب فى الأنبوبة فى كل ثانية . فمثلاً عندما ينساب حجم قدره $50\ cm^3$ من الماء خارجًا من أنبوبة كالمبينة بالشكل 20-9 فإن $Q = 50\ cm^3/s$.



شكل 20-9 :
يعطى معدل السيلان خلال أنبوبة بقانون بوازيل . السرعة v هنا فى حالة $P_1 > P_2$.

إذا كان P_1 ، P_2 يمثلان ضغط السائل عند طرفى الأنبوبة الموضحة بالشكل 19-9 فإن $P_1 - P_2$ يسمى الضغط التفاضلى ؛ وكما هو متوقع فإن معدل الانسياب خلال الأنبوبة يتناسب مع الضغط التفاضلى فى حالة السوائل البسيطة . من المتوقع أيضًا أن يزداد معدل الانسياب كلما زاد نصف قطر الأنبوبة R وقل طولها L . بدراسة تأثير مختلف هذه العوامل على معدل الانسياب استطاع جان لويس مارى بوازيل (1799-1879) استنتاج معادلة لانسياب السوائل فى مثل هذه المواقف . وعندما لا يكون معدل الانسياب كبيرًا جدًا ، يمكن كتابة هذه المعادلة على الصورة :

$$Q = \left(\frac{\pi R^4}{8\eta L}\right)(P_1 - P_2) \qquad (9\text{–}17)$$

وتعرف هذه المعادلة عادة باسم **قانون بوازيل** . لاحظ أن Q تتناسب مع R^4 .



مثال توضيحى 3-9

يتعرض المسنون كثيرًا لمصاعب متعلقة بالدورة الدموية نتيجة تراكم الرواسب فى الشرايين . بأى معامل يقل معدل انسياب الدم فى شريان إذا نقص نصف قطره إلى النصف ؟

استدلال منطقى : يخبرنا قانون بوازيل أن حجم الدم Q المنساب خلال شريان فى الثانية الواحدة يرتبط بنصف قطره طبقًا للعلاقة :

$$Q \propto R^4$$

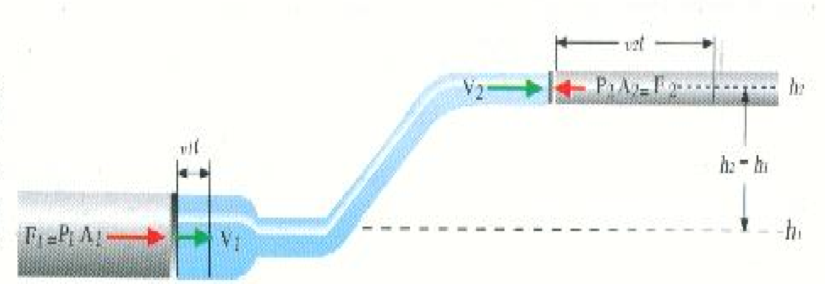
$Q = (\text{constant})(R_0/2)^4$ في الشريان الأصلي ، بينما $Q_0 = (\text{constant})\left(R_0^4\right)$ في حالة الشريان الضيق . من هاتين المعادلتين نجد أن $Q/Q_0 = 1/16$. أي أن معدل الانسياب يقل بمعامل قدره 16 . وواضح من حقيقة أن Q يعتمد بشدة على R لماذا تنشأ مشاكل الدورة الدموية بسبب الرواسب في الشرايين .

تمرين : أوجد معدل انسياب الماء في أنبوبة شعرية طولها 20 cm وقطرها 0.15 cm إذا كان الضغط التفاضلي على طول الأنبوبة 4.0×10^3 Pa . اعتبر أن لزوجة الماء 0.80 mPl .

الإجابة : $3.1\ \text{cm}^3/\text{s}$.

9-8 معادلة برنولي

رأينا مما سبق أن لكل سائل لزوجة معينة . وإذا كانت اللزوجة كبيرة يكون من الضروري بذل شغل كبير لدفع السائل في الماسورة أو الأنبوبة . ونتيجة لقوى الاحتكاك بين طبقات السائل أثناء الانسياب سوف تفقد بعض الطاقة وتظهر في نهاية الأمر على هيئة حرارة تسبب تسخين السائل . ولكن بعض السوائل تمتاز بأن لزوجتها من الصغر بحيث تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية مهملة ، على الأقل لبعض الأغراض وفي هذه الحالة يمكن إيجاد علاقة هامة للضغط في سائل متحرك تسمى **معادلة برنولي** نسبة إلى دانيل برنولي الذي قام بنشرها في عام 1738 .



شكل 21-9 : الشغل المبذول بواسطة F_1 (وهو يساوي P_1A_1) يساوي الشغل المبذول ضد القوة F_2 (والذي يساوي P_2A_2) مضافاً إليه التغيرات في طاقتي الحركة والوضع للسائل .

لندرس حالة انسياب سائل في ماسورة كالمبينة بالشكل 21-9 . هذه الماسورة مملوءة تماماً بسائل غير قابل للانضغاط بين كباسين لا احتكاكيين . لنفرض أن الكباس 1 يدفع إلى اليمين بسرعة ثابتة مقدارها v_1 وأن الكباس 2 يتحرك إلى اليمين بسرعة مقدارها v_2 . في هذه الحالة تتزن القوة F_1 المؤثرة على الكباس 1 مع القوة P_1A_1 الناتجة عن ضغط السائل ، حيث A_1 مساحة الكباس 1 . (لابد أن تتعادل القوتان المؤثرتان على الكباس وإلا سبب صافي القوة المؤثرة عليه تسارعه ، وقد ذكرنا سابقاً أنه يتحرك بسرعة ثابتة) . وبالمثل فإن $F_2 = P_2A_2$ عند الكباس 2 . وحيث أن المسافة التي يتحركها الكباس 1 في زمن قدره t هي v_1t فإن حجم السائل الذي يدفعه هذا الكباس يكون $(v_1t)(A_1)$. وحيث أن السائل غير قابل للانضغاط ، إذن لابد أن يفسح الكباس 2 مكاناً لحجم مساوٍ من السائل . وعليه فإن $(v_1t)(A_1) = (v_2t)(A_2)$ ، أو :

$$v_1A_1 = v_2A_2 \tag{9-18}$$

وقد تساءل برنولى عما يحدث نتيجة للشغل المبذول بواسطة الكباس 1 ، وهو يساوى $F_1(v_1t)$ ، وحيث أن $F_1 = P_1A_1$ ، إذن :

$$\text{دخل الشغل} = P_1A_1v_1t$$

وحيث أن الكباس 2 يبذل كمية من الشغل قدرها $F_2(v_2t)$ فإن جزءًا من دخل الشغل قد استخدم هناك .

بالإضافة إلى ذلك فإن السائل المضغوط إلى اليمين بواسطة الكباس 1 ينتقل بالطبع إلى الأنبوبة العلوية . ونتيجة لذلك يكتسب هذا السائل (وكتلته M وحجمه V) كمية معينة من طاقة الوضع . وأيضًا ، حيث أن السائل يتحرك الآن بسرعة مختلفة v_2 فإن طاقة حركته سوف تتغير أيضًا . وبالطبع سوف تتحول بعض الطاقة إلى طاقة حرارية نتيجة للقوى الاحتكاكية التى تسببها لزوجة السائل ، ولكننا سوف نفرض أن هذه الكمية مهملة .

بهذا الأسلوب يمكن كتابة المعادلة التالية التى تخبرنا بما حدث لدخل الشغل :

التغير فى KE + التغير فى GPE + خرج الشغل = دخل الشغل

أو ، باستخدام رموز الشكل 21–9 :

$$P_1A_1v_1t = P_2A_2v_2t + Mg(h_2 - h_1) + \frac{1}{2}Mv_2^2 - \frac{1}{2}Mv_1^2$$

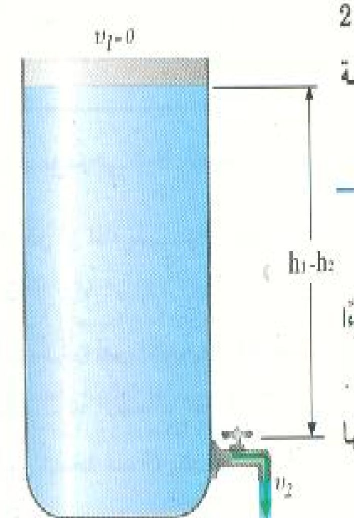
حيث M كتلة الحجم المعنى من السائل وقدره A_1v_1t . ومن تعريف الكثافة نجد أن :

$$M = \rho A_1v_1t = \rho A_2v_2t$$

وبالتعويض عن كتلة السائل فى المعادلة السابقة وإعادة ترتيب حدودها نحصل على المعادلة الآتية :

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \qquad (9\text{–}19)$$

وهذه هى **معادلة برنولى** . وواضح أن وجود الكباسين غير ضرورى لأن النقطتان 1 و 2 يمكن أن تكونا أى نقطتين فى السائل . لاحظ ، مع ذلك ، أن هذه المعادلة صالحة للتطبيق فقط إذا أمكن إهمال قوة الاحتكاك .



شكل 22–9 : تعطينا نظرية توريشيللى سرعة حركة السائل أثناء تدفقه من ذيل الماسورة .

مثال توضيحى 4–9 نظرية توريشيللى

يمثل الشكل 22–9 تطبيقًا بسيطًا لمبدأ برنولى . هذا الشكل يمثل خزانًا كبيرًا مملوءًا بسائل إلى ارتفاع قدره h_1 من القاع يوجد به ذيل ماسورة على ارتفاع h_2 من القاع أيضًا . إذا كان السطح العلوى للسائل معرضًا للجو ، أوجد مقدار السرعة التى ينساب بها السائل من ذيل الماسورة .

استدلال منطقى : سوف نطبق مبدأ برنولى على النقطة 1 التى تمثل هنا السطح العلوى للسائل والنقطة 2 وهى موضع ذيل الماسورة . وحيث أن ذيل الماسورة صغير جدًا سوف

يكون مقدار سرعة انسياب السائل منه v_2 أكبر كثيرًا من مقدار سرعة انسياب السائل v_1 عند السطح العلوى . ومن ثم يمكن اعتبار أن v_1 تساوى صفرًا بالتقريب . عندئذ يمكن كتابة معادلة برنولى كالتالى :

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

وحيث أن كلاً من P_1 و P_2 يساوى الضغط الجوى تقريبًا ، إذن يمكن اعتبار أنهما متساويان .

وعليه :

$$\rho g h_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

ومنه نحصل على :

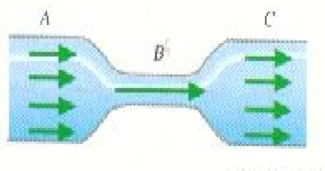
$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \qquad (9\text{–}20)$$

هذه هى **نظرية توريشيللى** . لاحظ أن سرعة التدفق تساوى سرعة جسم يسقط سقوطًا حرًا من ارتفاع قدره $h_1 - h_2$. وهذا يوضح أن تدفق كمية معينة من السائل من ذيل الماسورة يتم كما لو أن نفس الكمية من السائل قد أسقطت سقوطًا حرًا من مستوى سطح السائل إلى مستوى ذيل الماسورة . وبالطبع سوف ينخفض مستوى سطح السائل فى الخزان بعض الشىء ، وتتحول طاقة الجهد التثاقلى المفقودة نتيجة للسقوط إلى طاقة حركة للسائل المتدفق . وإذا وجه ذيل الماسورة إلى أعلى فإن طاقة الحركة سوف تسبب ارتفاع السائل المتدفق إلى نفس مستوى السائل فى الخزان قبل السقوط . ولكن عمليًا تؤدى فواقد طاقة اللزوجة إلى تغير النتيجة بعض الشىء .

تمرين : ما قيمة v_2 إذا كان الخزان مغلقًا عند طرفى الأعلى وكان الضغط فيه kP_0 ، حيث k مقدار ثابت ؟

الإجابة : $\sqrt{2g(h_1 - h_2) + 2(k-1)(P_t)/\rho}$

مثال توضيحى 9-5 الضغط فى ماسورة أفقية



شكل 9-23 : حيث أن سرعة السائل أكبر ما يمكن عند النقطة B فإن الضغط يكون أقل ما يمكن عند هذه النقطة .

افترض أن الماء ينساب فى نظام من المواسير كالمبين بالشكل 9-23 . فى هذه الحالة لابد أن يكون مقدار سرعة الماء فى الماسورة الضيقة عند النقطة B أكبر منه عند النقطتين A و C لأن نفس الكمية من الماء يجب أن تعبر النقط A و B و C فى كل ثانية . بفرض أن مقدار سرعة الانسياب عند A و C تساوى 0.200 m/s ، وتساوى 2.00 m/s عند B ، قارن الضغط عند B بالضغط عند A .

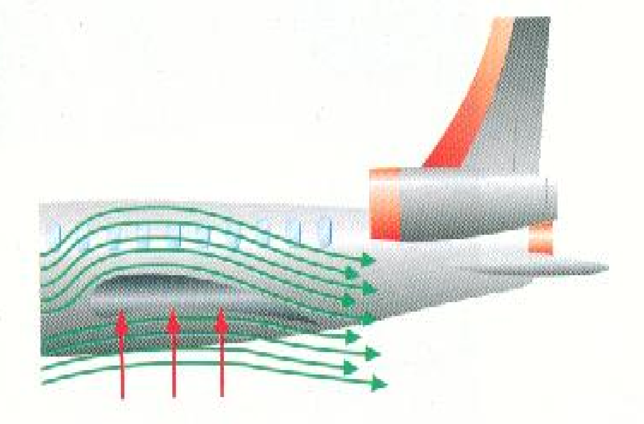
استدلال منطقى : بتطبيق معادلة برنولى وملاحظة أن متوسط طاقة الجهد التثاقلى يساوى مقدارًا ثابتًا عند النقط الثلاث جميعًا نجد أن :

$$P_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2$$

وبوضع $v_A = 0.200\ \text{m/s}$ ، $v_B = 2.00\ \text{m/s}$ ، $\rho = 1000\ \text{kg/m}^3$ ، نجد أن $P_A - P_B = 1980\ \text{Pa}$. وعليه فإن **ضغط السائل داخل الاختناق أقل كثيرًا منه داخل الماسورتين الكبيرتين الموجودتين على جانبيه** . وربما كان هذا عكس ما قد يمكن أن يتوقعه المرء فى البداية ، ولكن هذا صحيح وله تطبيقات واسعة . فعلى سبيل المثال يستخدم الشفاط (جهاز سحب الغاز) فى الحصول على تفريغ جزئى بدفع الماء بشدة خلال اختناق حيث يقل الضغط بدرجة كبيرة بسبب الزيادة فى سرعة الانسياب .

يمكن إثبات أن الضغط عند A يجب أن يكون أكبر منه عند B بطريقة كيفية كالتالى بما أن كل حجم صغير من السائل يعانى تسارعًا عند انتقاله من A إلى B ، إذن لابد أن يكون هذا السائل واقعًا تحت تأثير قوة غير متزنة متجهة إلى اليمين . ولكى تنشأ هذه القوة يجب أن يقل الضغط فى الاتجاه من A إلى B ، ويجب أن تكون قادرًا على أن تعكس هذا الخط فى التفكير لإثبات أن الضغط عند C أكبر من الضغط عند B .

هذه النتيجة - وهى أن **الضغط يكون منخفضًا حيث تكون السرعة عالية** ، تعطينا تفسيرًا لعدد من الحقائق المتباينة كرفع الهواء لجناح الطائرة عند الإقلاع والمسار المنحنى لكرة يقذفها لاعب كرة قدم ماهر . ويوضح الشكل 24-9 انسياب الهواء حول جناح طائرة . وحيث أن الهواء يجب أن يقطع مسافة أطول فوق السطح العلوى للجناح من المسافة اللازم قطعها تحت الجناح ، إذن لابد أن تكون سرعة الهواء فوق الجناح أكبر منها تحت الجناح . ومن ثم يكون الضغط فوق الجناح أقل منه تحت الجناح ، وبذلك تؤثر القوة المحصلة على الجناح إلى أعلى . وتستخدم نفس هذه الظاهرة أيضًا فى تصميم سيارات السابق حيث تستخدم زعانف شبيهة بالأجنحة لتوليد قوة مؤثرة إلى أسفل تؤدى إلى زيادة القوة العمودية ، وبالتالى إلى زيادة قوة الاحتكاك بين إطارات السيارة ومضمار السباق . هذا يمكن السيارة من الحركة فى المنحنيات بسرعة أكبر مما يمكنها فى الحالات الأخرى . ■



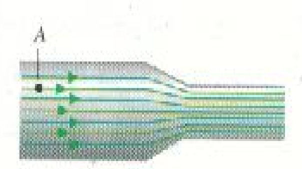
شكل 24-9 : تؤثر على جناح الطائرة قوة متجهة من منطقة السرعة المنخفضة (الضغط العالى) الموجودة تحت الجناح إلى منطقة السرعة العالية (الضغط المنخفض) الموجودة فوق الجناح .

9-9 الانسياب الطبقى مقابل الانسياب المضطرب

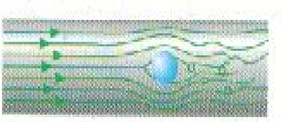
لنتفحص الآن كيفية انسياب السوائل فى المواسير . عندما يتحرك سائل فى ماسورة

تحاول قوى الاحتكاك التى تؤثر بها جدران الماسورة على السائل أن تكبح انسياب السائل ، مثلها في ذلك مثل قوى اللزوجة داخل السائل . ونتيجة لذلك سوف ينساب السائل الملاصق للجدران بسرعة أقل من سرعة حركة السائل القريب من منتصف الماسورة . ويوضح الشكل 25-9أ هذه الظاهرة ، حيث تمثل أطوال الأسهم مقدار السرعة فى المواضع المختلفة فى الأنبوبة . (يلاحظ أن السرعة v فى المثالين التوضيحيين 4-9 و 5-9 هى السرعة المتوسطة عبر مقطع الماسورة) .


(أ) سرعة السائل



(ب) خطوط الانسياب (انسياب طبقى)


(ج) انسياب مضطرب

شكل 25-9 :
أمثلة للملامح المختلفة للانسياب فى ماسورة : (أ) جانبية السرعة ، (ب) الانسياب الطبقى ، (جـ) الانسياب المضطرب .

ويمثل الشكل 25-9ب سمة أخرى لانسياب سائل فى ماسورة . لنفرض أن ذرة دقيقة من التراب ، لتلك الذرة الموجودة عند النقطة A ، تنساب مع السائل إذا كان معدل الانسياب منخفضًا سوف تتبع هذه الذرة الخط الموضح أثناء حركتها داخل الماسورة . كذلك فإن الذرات الترابية الأخرى ، والسائل أيضًا ، سوف تتبع خطوطًا ملساء مشابهة . ويطلق على هذه الخطوط اسم **خطوط الانسياب** ، ويسمى هذا النوع من انسياب السوائل **بالانسياب الطبقى** . إذن ، فى الانسياب الطبقى يتبع كل عنصر من السائل خط انسياب تكرارى معين .

أما إذا كان مقدار سرعة الانسياب كبيرًا سوف يحدث تغير حاد فى نسق الانسياب . فبدلاً من أن تكون خطوط الانسياب ملساء ناعمة فإنها ستصبح خطوطًا ملتوية مضطربة كما هو مبين بالشكل 25-9جـ ، ويعرف هذا النوع من الانسياب باسم **الانسياب المضطرب** . وفى هذه الحالة تكون فواقد الطاقة الاحتكاكية (أو اللزجة) أكبر مما فى حالة الانسياب الطبقى ، وهذا بدوره يسبب زيادة المقاومة الاحتكاكية على الأسطح المتلامسة مع السائل المنساب . وتجدر الإشارة فى هذا المقام أن قانون بوازيل لا ينطبق فى حالة الانسياب المضطرب .


توضح قطع الشرائط الصغيرة نمط انسياب الريح على سطح سيارة فى اختبار نفق الرياح .

ليس من الضرورى أن يكون السائل (أو المائع عمومًا) محصورًا فى ماسورة لكى يحدث هذان النوعان من الانسياب ، إذ يشاهد هذا السلوك عند انسياب المائع على أى سطح مثل جناح الطائرة أو الأسطح الخارجية لهيكل السيارة . ونظرًا لزيادة الاحتكاك المرتبطة ببداية الاضطراب يحاول مصممو السيارات والطائرات تصميم أسطح الطائرات والسيارات بحيث تقل التأثيرات الاضطرابية إلى الحد الأدنى ، ولهذا يكون ابتكار طريقة للتنبؤ ببداية الاضطراب على قدر كبير من الأهمية من الناحية العملية .

عندما يكون انسياب السائل حول الجسم طبقيًا ، تتناسب **القوة المثبطة أو قوة المقاومة** ، F_D تناسبًا خطيًا مع مقدار سرعة الانسياب v . ومع ذلك فإن حساب قوة المقاومة رياضيًا عملية صعبة عمومًا ، ولذلك فإنها تقاس عادة بالطرق العملية . فمثلاً ، تستخدم أنفاق الرياح لقياس قوى المقاومة الناتجة عند انسياب الهواء على أسطح السيارات والطائرات . وفى عام 1843 استطاع الفيزيائى الإنجليزى ج. ستوكس استنتاج علاقة بين F_D و v فى حالة كرة نصف قطرها r تتحرك بسرعة صغيرة فى مائع لزوجته η ، وتعرف هذه العلاقة **بقانون ستوكس** :

$$F_D = 6\pi\eta r v \qquad (9\text{-}21)$$

أما فى حالة السرعات العالية بدرجة كافية لحدوث الانسياب المضطرب فإن قوة المقاومة لا تتناسب ببساطة مع مقدار السرعة ، بل إنها تمثل بمتسلسلة معقدة بدلالة السرعة مرفوعة إلى أسس أعلى . وقد وجد فى معظم الحالات المتعلقة بالسيارات والطائرات أن F_D تتناسب طرديًا مع v^2 :

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \qquad (9\text{-}22)$$

حيث A المساحة الأمامية للسيارة أو الطائرة ، ويعرف الثابت اللابعدى C_D **بمعامل مقاومة الهواء** . ويمثل الجدول 5-9 بعض قيم معامل مقاومة الهواء لبعض الأجسام .

وبالرغم من أن معالجة الانسياب المضطرب رياضيًا مسألة فى غاية الصعوبة ، فإن هناك مفهومًا موحدًا يبسط الموقف بدرجة كبيرة . ذلك أن التجربة قد أثبتت أن الانسياب الطبقى يتحول إلى انسياب مضطرب عندما تصل قيمة ثابت لا بعدى يسمى **عدد رينولدز** N_R إلى قيمة حرجة معينة ، ويعطى عدد رينولدز بالعلاقة :

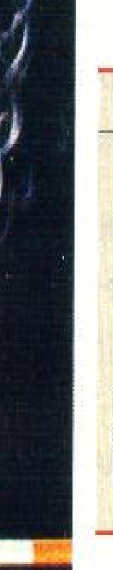
$$N_R = \rho v d / \eta \qquad (9\text{-}23)$$

حيث ρ ، v ، η كثافة المائع ومقدار سرعة انسيابه ولزوجته على الترتيب ؛ d بعد مميز لنظام الانسياب وهو يتوقف على التطبيق المعنى فى كل حالة على حدة . فمثلاً ، عندما يحدث انسياب المائع فى ماسورة يكون d هو نصف قطر الماسورة ؛ وفى حالة حركة كرة فى مائع يكون d هو قطر الكرة ؛ وإذا كان الجسم غير منتظم الشكل كالطائرة مثلا ، يكون d هو متوسط أبعاد الطائرة . ويمثل الجدول 6-9 . بعض الأمثلة لأعداد رينولدز الحرجة .

جدول 5-9 :

القيم النمطية لمعامل مقاومة الهواء المقاسة باستخدام نفق الرياح .

الجسم	معامل مقاومة الهواء
لوح مسطح	1.2
السابح في الهواء (ممتد أفقيًا)	1.0
دراجة نارية وراكبها	0.9
سيارة (سيدان)	0.5
سيارة رياضية (ذات خطوط انسيابية)	0.25
قطار ذو خطوط انسيابية	0.15



مثال للانتقال من الانسياب الطبقى إلى الانسياب المضطرب .

جدول 6-9 :

القيم الحرجة التقريبية لعدد رينولدز .

ظاهرة الانتقال	N_R
ـ القيمة العظمى لعدد رينولدز N_R للانسياب الطبقى حول كرة (قانون ستوكس) .	10
ـ بداية الاضطراب في ماسورة أسطوانية ذات مدخل غير منتظم .	1000 - 1200
ـ بداية الاضطراب فى ماسورة أسطوانية طويلة (حد صلاحية قانون بوازيل) .	2000 - 3000
ـ بداية الاضطراب فى المواسير ذات مدخل مزود بمنفث ملائم .	20,000 - 40,000
ـ الحد العلوى عندما يتبع سلوك الانسياب العلاقة $F_D \propto v^2$	3×10^5

وبالرغم من أن القيم الحرجة لعدد رينولدز تفتقر إلى الدقة فإنها نافعة جدًا فى تعيين ما يسمى **قوانين المقياس النسبى** . فمثلاً ، إذا كان لدينا نظامان أحدهما نموذج مطابق للآخر بمقياس رسم معين فإن نمطى انسيابهما سيكونان متطابقين إذا كانت قيمتى N_R لهما متساويتان . ويقال لمثل هذين النظامين أنهما **متشابهان ديناميكيًا** . هذا المفهوم هو الأساس الفيزيائى لاختبارات أنفاق الرياح التى تجرى على نماذج مطابقة مصغرة للسيارات والطائرات . ويكون نمطا الانسياب متشابهين عند تساوى حاصل الضرب vd (ومن ثم N_R) . وعليه فإن الانسياب البطئ (v صغيرة) لمائع حول جسم كبير (d كبيرة) سيطابق انسياب نفس المائع بضعف السرعة حول جسم أصغر مرتين .

مثال 8-9 :

بأى سرعة يمكن أن تسقط قطرة مطر قطرها 3.0 mm قبل أن يصبح انسياب الهواء حولها انسيابًا مضطربًا ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ماذا تمثل قطرة المطر الساقطة ؟

الإجابة : يمكن تقريب قطرة المطر إلى جسم كروى . وعندما تسقط قطرة المطر فى الهواء بسرعة مقدارها v سوف ينساب الهواء عليها بنفس السرعة .

سؤال : ما هو المبدأ الممكن استخدامه لتحديد ما إذا كان الانسياب مضطربًا ؟

الإجابة : قيمة عدد رينولدز . ومن الجدول 9–6 نجد أن القيمة الحرجة لعدد رينولدز فى حالة الكرة هى $N_R = 10$.

سؤال : هل لدينا المعطيات الكافية لإيجاد v_{max} ؟

الإجابة : يمكن إيجاد لزوجة وكثافة الهواء من الجداول :

$$\rho = 1.29 \ \text{kg/m}^3 \quad \text{و} \quad \eta = 0.019 \times 10^{-3} \ \text{Pl}$$

كذلك فإن المعامل d فى حالة كرة ساقطة هو قطر الكرة ، أى 3.0 mm .

الحل والمناقشة :

بحل المعادلة (9–24) بالنسبة إلى v :

$$v = N_R \eta / \rho d$$

يصبح الانسياب مضطربًا إذا زادت قيمة السرعة عن السرعة الحرجة . إذن ، بوضع $N_R = 10$ نجد أن :

$$v_{max} = \frac{(10)(1.9 \times 10^{-5} \ \text{Pl})}{(1.29 \ \text{kg/m}^3)(3.0 \times 10^{-3} \ \text{m})}$$

$$= 4.9 \times 10^{-2} \ \text{m/s} = 4.9 \ \text{cm/s}$$

لاحظ مدى صغر هذه السرعة . لاحظ أيضًا أن مقدار السرعة يتناسب طرديًا مع قطر قطرة المطر .

مثال 9-9 :

ما هى القيمة التقريبية لحجم الماء الذى يمكن أن ينساب فى الثانية خلال أنبوبة قطرها 2.0 cm قبل حدوث الانسياب المضطرب ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما شرط حدوث الانسياب المضطرب ؟

الإجابة : يحدث الاضطراب عندما يزيد عدد رينولدز عن القيمة الحرجة والتى تتراوح بين 2000 و 3000 كما هو مبين بالجدول 9–6 . ويمكننا اختيار $N_R = 2000$ فى هذا المثال .

سؤال : ما هى العلاقة بين N_R والحجم المنساب فى الثانية ؟

الإجابة : القيمة الحرجة لعدد رينولدز N_R تعطينا القيمة العظمى لمقدار سرعة الانسياب v ، ويكون المعدل الحجمي للانسياب $\Delta V/\Delta t = vA$.

الحل والمناقشة : بوضع في $N_R = 2000$ في المعادلة (9–23) واستعمال لزوجة الماء المعطاة بالجدول 9–4 نحصل على القيمة العظمى لمقدار سرعة الانسياب في حالة الانسياب الطبقي :

$$v_{max} = \frac{(2000)(0.801\times10^{-3}\ \text{Pl})}{(1.00\times10^{3}\ \text{kg/m}^3)(2.00\times10^{-2}\ \text{m})} = 0.0801\ \text{m/s} = 8.01\ \text{cm/s}$$

ولكن مساحة مقطع الأنبوبة هي $A = \pi d^2/4 = 3.14\times10^{-4}\ \text{m}^2 = 3.14\ \text{cm}^2$ ، إذن ، القيمة العظمى للمعدل الحجمي للانسياب تكون :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = (8.01\ \text{cm/s})(3.14\ \text{cm}^2) = 25.2\ \text{cm}^2/\text{s}$$

تمرين : ما هما القيمتان العظميان لمقدار سرعة الانسياب والمعدل الحجمي للانسياب في حالة الانسياب الطبقي للماء في ماسورة قطرها 10 cm ؟

الإجابة : $v_{max} = 1.60\ \text{cm/s}$ ، $\Delta V/\Delta t = 126\ \text{cm}^3/\text{s}$.

مثال 9-10 :

ما قيمة القدرة الحصانية اللازمة لتحريك سيارة في الهواء ($\rho = 1.29\ \text{kg/m}^3$) بسرعة ثابتة مقدارها 60.0 mi/h في طريق مستو ؟ افترض أن المساحة الأمامية A للسيارة $2.30\ \text{m}^2$ وأن كتلة السيارة 1250 kg . افترض أيضًا أن عدد رينولدز للسيارة عند هذه السرعة أكبر من القيمة الحرجة .

استدلال منطقي :

سؤال : بماذا يرتبط شرط القدرة في هذا المثال ؟

الإجابة : لتحريك السيارة بسرعة ثابتة يجب أن يولد المحرك قوة كافية عن طريق إطارات عجلات الدفع تساوي قوة مقاومة الهواء المؤثرة على السيارة نتيجة لانسياب الهواء عليها . عليك أن تتذكر أن القدرة الناتجة عن قوة ما هي حاصل ضرب القوة في مقدار سرعة حركة الجسم الذي تؤثر عليه هذه القوة .

سؤال : كيف يمكن حساب قوة مقاومة الهواء ؟

الإجابة : إذا تعدت قيمة عدد رينولدز القيمة الحرجة N_R يكون الانسياب مضطربًا ، وتعطى قوة مقاومة الهواء حينئذ بالمعادلة (9–22) . ويمكننا أن نجد من الجدول 9–5 أن قيمة معامل مقاومة الهواء C_D هي 0.50 ؟

سؤال : ما هي المعادلة الناتجة للقدرة في هذه الحالة ؟

الإجابة : من المعادلة (9–22) نحصل على $F_{app} = F_D = \frac{1}{2}\rho A C_D v^2$. إذن :

$$\text{القدرة} = F_{app}v = \left(\frac{1}{2}\rho A C_D v^2\right)v = \frac{1}{2}\rho A C_D v^3$$

الحل والمناقشة : أولاً تحول 60 mi/h إلى 26.8 m/s . وباستخدام المعطيات نجد أن :

$$\text{القدرة} = \frac{1}{2}(1.29\ \text{kg/m}^3)(2.30\ \text{m}^2)(0.50)(26.8\ \text{m/s})^3 = 1.4 \times 10^4\ \text{W}$$

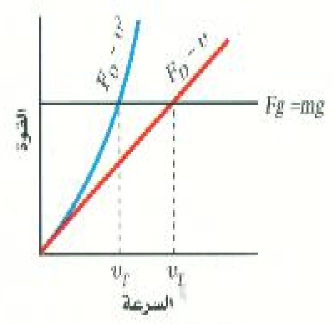
وحيث أن 1 hp = 746 W ، إذن هذه القدرة تساوى 19 hp (1.4 × 104 W)(1 hp/746 W)

لاحظ أن القدرة تعتمد اعتمادًا شديدًا على مقدار سرعة السيارة ($P \propto v^3$) وإذا سارت السيارة بسرعة مقدارها 30 mi/h فلن يلزمها سوى 1/8 هذه القدرة لمعادلة قوة مقاومة الهواء هذا سبب رئيسى فى أن استهلاك الوقود يعتمد بشدة على السرعة .

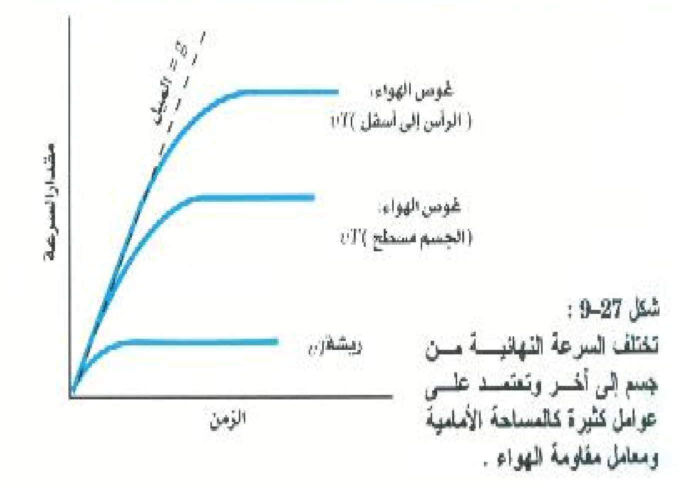
9-10 السرعة النهائية



يتسارع السابحون فى الهواء إلى سرعة نهائية ثابتة تتساوى عندها قوة مقاومة الهواء إلى أعلى مع الوزن إلى أسفل .



شكل 9-26 :
القوى المؤثرة على جسم ساقط . السرعة النهائية هى السرعة التى تتساوى عندها قوة مقاومة الهواء مع وزن الجسم mg .



شكل 9-27 :
تختلف السرعة النهائية من جسم إلى آخر وتعتمد على عوامل كثيرة كالمساحة الأمامية ومعامل مقاومة الهواء .

تعاملنا حتى الآن مع الأجسام الساقطة باعتبارها أجسامًا متسارعة بعجلة ثابتة g . ولكن هناك أمثلة كثيرة تكون فيها الأجسام الساقطة متحركة بسرعة ثابتة وليس بعجلة ثابتة خلال الجزء الأكبر من فترة سقوطها . وفى مثل هذه الحالات تسمى تلك السرعة الثابتة بالسرعة

النهائية . وبالطبع يعنى ثبوت السرعة أن صافى القوة المؤثر على الجسم صفر ، وفى هذه الحالة تكون مقاومة الهواء المؤثرة على الجسم إلى أعلى نتيجة لحركته فى الهواء مساوية لقوة الجاذبية المؤثرة على الجسم إلى أسفل . ويمكن تخيل هذا الموقف بالاستعانة بالشكل 26-9 الذى يمثل القوة مقابل السرعة . لاحظ أن قوة مقاومة الهواء F_D تتناسب غالبًا مع v أو مع v^2 فى بعض الحالات كما رأينا فى القسم السابق ، وهاتان العلاقتان موضحتان فى الشكل . وحيث أن قوة الجاذبية mg لا تعتمد على v فإنها تظهر فى الشكل على هيئة خط أفقى . وبزيادة سرعة الجسم تقترب F_D تدريجيًا من القيمة mg ، وعندما تصل سرعة الجسم إلى v_T يتحقق شرط تلاشى صافة القوة ويصبح $F_D = mg$. ويمكن تمثيل مثل هذه المواقف برسم السرعة مقابل الزمن كما هو مبين بالشكل 27-9 فى حالة السرعات النهائية الصغيرة والمتوسطة والكبيرة . هذه يمكن أن تكون على سبيل المثال حالة ريشة خفيفة وغواص فى الهواء فى حالة السقوط وجسمه مسطح فى اتجاه عمودى على اتجاه السقوط وغواص فى الهواء فى حالة السقوط ورأسه إلى أسفل ويداه مضمومتان إلى جنبيه . ويلاحظ فى كل حالة أن الجسم يبدأ السقوط بنفس العجلة g . هذا وتعتمد السرعة النهائية على كثير من خواص الجسم الساقط ككثافته ومساحته الأمامية وشكله .. إلخ . لندرس الآن سقوط كرة فى الهواء عندما يكون الانسياب طبقيًا .

مثال 11-9 :

تهبط الدقائق المعلقة فى سائل يبطئ بسرعة نهائية تعرف بمعدل الترسيب . أوجد معدل الترسيب لدقائق كروية الشكل نصف قطرها $r = 2.00 \times 10^{-3}$ cm عند سقوطها فى ماء درجة حرارته 20.0°C . كثافة مادة الدقائق 1050 kg/m^3 ولزوجة الماء 1.00 mPl .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يتعين به معدل الترسيب ؟

الإجابة : معدل الترسيب هو سرعة نهائية ، وعليه فإن الشرط هو أن يكون صافى القوة المؤثرة على الدقائق صفرًا .

سؤال : ما هى القوى المختلفة المؤثرة على الدقائق ؟

الإجابة : تؤثر الجاذبية إلى أسفل ، وتؤثر قوتان إلى أعلى هما قوة الطفو وقوة اللزوجة .

سؤال : ما معادلة كل من هذه القوة ؟

الإجابة : $F_g = mg$ ، $F_B = \rho_f Vg$ (مبدأ أرشميدس) ، $F_D = 6\pi\eta r v_T$ (قانون ستوكس) .

سؤال : ما هى المعادلة التى نحصل عليها عندما يكون صافى القوة صفرًا ؟

الإجابة : $$mg = \rho_f V_g + 6\pi\eta r v_T$$

حيث : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ و : $m = \rho_p\left(\frac{3}{4}\right)\pi r^3$

الحل والمناقشة : بإجراء التعويضات وترتيب الحدود تتحول معادلة تلاشى صافى القوة إلى :

$$(\rho_p - \rho_f)\frac{4}{3}\pi r^3 g - 6\pi\eta r v_T = 0$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v_T نحصل على :

$$v_T = \frac{2r^2 g}{9\eta}(\rho_p - \rho_f) = 4.36 \times 10^{-3}\ \text{cm/s}$$

وهذه سرعة منخفضة حقيقية . وبالرغم من ذلك فإن كأسًا يحتوى على هذا المحلول سوف يروق تمامًا بالترسيب خلال بضع ساعات .

ويمكننا أن نرى أن معدل الترسيب يعتمد على الفرق بين كثافتى الدقائق والسائل ، وأيضًا على مساحة مقطع (r^2) الدقائق . لاحظ أيضًا أن v_T تتناسب مع g .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) المائع ، (ب) الجوامد البلورية وغير البلورية ، (جـ) الكثافة ، (د) قانون هوك ، (هـ) الإجهاد والانفعال ، (و) معامل المرونة ، (ز) معامل يونج ، (ح) معامل القص (المرونة القصية) ، (ط) معامل المرونة الحجمية ، (ى) الباسكال ، (ك) مبدأ باسكال ، (ل) قوة الطفو ، (م) مبدأ أرشميدس ، (ن) الانسياب الطبقى والمضطرب ، (س) معادلة برنولى ، (ع) قوة المقاومة ، (ف) السرعة النهائية ، (ص) اللزوجة ، (ق) عدد رينولدز .

2 ـ استخدام تعريف الكثافة فى المواقف البسيطة .

3 ـ استخدام صورة قانون هوك بدلالة الإجهاد والانفعال لحساب تشوه مادة مرنة فى حالة الشد والقص والانضغاط الحجمى بمعلومية معامل المرونة الملائم .

4 ـ إيجاد القوة بمعلومية الضغط والعكس .

5 ـ حساب الضغط المطلق ومدلول ضغط المقياس على عمق معين فى سائل باستخدام المعطيات المناسبة .

6 ـ شرح عمل البارومتر والمانومتر واستخدامهما لحساب ضغط الغاز .

7 ـ التعبير عن الضغط بالباسكال والتور والضغط الجوى والبار .

8 ـ شرح نظرية المكبس الهيدروليكى .

9 ـ استخدام مبدأ أرشميدس لإيجاد قوة الطفو المؤثرة على جسم معلوم الكتلة والكثافة (أو الحجم) .

10 ـ تعريف كل كمية فى معادلة بوازيل واستخدامها فى الحسابات البسيطة .

11 ـ استخدام معادلة برنولى لاشتقاق نظرية توريشيللى وإثبات أن الضغط يكون أقل ما يمكن عندما تكون السرعة أكبر ما يمكن .

12 ـ ربط قوة المقاومة المؤثرة على جسم بسرعته النهائية فى حالة السقوط الحر .

13 ـ استخدام عدد رينولدز والمعلومات المناسبة الأخرى لحساب القيمة التقريبية للسرعة الحرجة عند بداية الانسياب المضطرب فى مائع .

14 ـ حساب قوة المقاومة نتيجة للانسياب اللزج عند سرعات انسياب مختلفة وفى حالات موائع مختلفة بمعلومية عدد رينولدز وأبعاد الجسم ومعامل مقاومة الهواء .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

وحدات الضغط :

$1\ N/m^2 = 1\ Pa$

$1\ atm = 1.01325 \times 10^5\ Pa$

$1\ torr = 1\ mmHg = 133.3\ Pa = (1/760)\ atm$

$1\ bar = 10^5\ Pa$

وحدات اللزوجة :

$1\ Pa \cdot s = 1$ poiseuille (Pl)

1 poise (P) = 0.1 Pl

1 centipoise (cP) = 10^{-3} Pl = 1 mPl

تعريفات ومبادئ أساسية :

الكتافة الكتلية :

$$\rho = \frac{\text{الكتلة}}{\text{الحجم}} = m/V\ (kg/m^3) \qquad (9\text{–}1)$$

الوزن النوعى (SG):

$$SG = \frac{\rho}{\rho H_2O} \qquad (9\text{–}2)$$

الإجهاد :

أولاً : (9–3)

$$\text{الإجهاد الطولى} = \frac{F}{A}$$

حيث F عمودية على مستوى A .

ثانيًا :

$$\text{الإجهاد القصى} = \frac{F}{A}$$

حيث F عمودية على مستوى A .

ثالثًا :

$$\text{الإجهاد الحجمى} = -\Delta P$$

الانفعال :

أولاً :

$$\text{الانفعال الطولى} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

حيث ΔL يوازى L_0 .

ثانيًا :

$$\text{الانفعال القصى} = \frac{\Delta L}{L_0} = \phi \ (\text{زاوية القص})$$

حيث ΔL عمودى على L_0 .

ثالثًا :

$$\text{الانفعال الحجمى} = \frac{\Delta V}{V}$$

معامل المرونة (N/m^2 أو Pa) :

$$\text{معامل المرونة} = \frac{\text{الإجهاد}}{\text{الانفعال}}$$

أولاً :

$$\text{معامل يونج} = Y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} \qquad (9\text{–}7)$$

ثانيًا :

$$\text{معامل القص (المرونة القصية)} \quad S = \frac{F/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F/A}{\phi} \qquad (9\text{–}8)$$

ثالثًا:

$$\text{معامل المرونة الحجمية} \quad B = \frac{-\Delta P}{\Delta V/V_0} \qquad (9\text{–}9)$$

الضغط (P) :

$$P = \frac{F_\perp}{A} \quad (\text{N/m}^2 = \text{Pa}) \qquad (9\text{–}10)$$

مدلول ضغط القياس :

$$P_G = P_{tot} - P_a \qquad (9\text{–}12)$$

مدلول ضغط القياس نتيجة لعمود من مائع

$$P_G = \rho_f g h$$

حيث ρ_f كثافة المائع ، h العمق .

مبدأ أرشميدس :

قوة الطفو F_B تساوى وزن المائع المزاح بواسطة الجسم المغمور جزئيًا أو كليًا فى المائع .

خلاصة :

1 ـ بالنسبة إلى جسم حجمه V مغمور كليًا فى المائع : $F_B = \rho_f V g$

2 ـ شرط طفو جسم كتلته M على سطح سائل هو : $F_B = Mg$

انسياب الموائع :

معادلة اللاانضغاطية : فى حالة السوائل غير القابلة للانضغاط :

$$vA = \text{const.} \quad \text{(فى جميع نقط السائل)} \qquad (9\text{–}18)$$

حيث v سرعة الانسياب و A مساحة مقطع الانسياب .

اللزوجة (η) :

$$\eta = \frac{\text{الإجهاد القصى}}{\text{معدل القص}} = \frac{F/A}{v/L} \qquad (\text{Pa . s} = \text{Pl}) \qquad (9\text{–}16)$$

حيث v السرعة النسبية لطبقتين من المائع تفصلهما مسافة قدرها L .

قانون بوازيل :

معدل الانسياب Q فى سائل لزج :

$$Q = \left(\frac{\pi R^4}{8\eta L}\right)(P_1 - P_2) \quad (m^3/s) \qquad (9\text{–}17)$$

حيث R نصف قطر الماسورة ، L طول الماسورة ، $P_1 - P_2$ الضغط التفاضلى عبر الطول L .

مبدأ برنولى :

فى حالة الانسياب غير اللزج لسائل ثابت الكثافة :

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g h = \text{constant} \qquad (9\text{–}19)$$

فى جميع نقط السائل .

خلاصة :

1 ـ من نتائج مبدأ برنولى أن ضغط السائل فى أنبوبة أفقية يكون أصغر ما يمكن عندما تكون سرعة الانسياب أكبر ما يمكن .

عدد رينولدز (N_R) :

$$N_R = \frac{\rho v d}{\eta} \qquad (9\text{–}23)$$

حيث v سرعة الانسياب ، d قطر الأنبوبة أو قطر جسم كروى فى المائع النساب ، ρ كثافة المائع ، η لزوجة المائع .

خلاصة :

1 ـ القاعدة العامة هى أن انسياب مائع فى ماسورة يكون مضطربًا عندما تتعدى قيمة N_R حوالى 2000 . ويحدث الانتقال إلى الانسياب المضطرب فى حالة كرة متحركة فى مائع عندما يزيد N_R عن 10 تقريبًا .

قوة المقاومة :

عندما يكون الانسياب طبقيًا تعطى المقاومة المؤثرة على كرة نصف قطرها r تتحرك فى مائع بسرعة قدرها v بالمعادلة :

$$F_D = 6\pi\eta r v \qquad (9\text{–}21)$$

وهذا هو قانون ستوكس . وإذا كان الانسياب مضطربًا فإن قوة المقاومة تتناسب مع v^2 :

$$F_D = \frac{1}{2}\rho C_D A v^2 \qquad (9\text{–}22)$$

حيث ρ كثافة السائل ، A المساحة الأمامية للجسم ، C_D معامل مقاومة الهواء .

أسئلة وتخمينات

1 ـ كيف يمكنك تعيين كثافة (أ) قالب معدنى مكعب ؟ (ب) سائل ؟ (جـ) قطعة من الحجر ذات شكل غير منتظم ؟

2 ـ كيف يمكنك قياس (أ) معامل شد المطاط فى شريط من المطاط ؟ (ب) معامل قص الجيلاتين ؟ (جـ) معامل المرونة الحجمية للمطاط الرغوى ؟

3 ـ هل يعتمد ضغط الماء عند قاعدة سد على حجم البحيرة الموجودة خلف السد ؟

4 ـ ملأت قارورة جزئيًا بالزئبق ثم أغلقت بإحكام وشحنت فى سفينة فضائية . ما قيمة الضغط على عمق 2.0 cm فى الزئبق عند دوران القارورة حول الأرض وهى فى السفينة الفضائية ؟ وما مقدار الضغط على نفس العمق بعد هبوط السفينة على سطح القمر ؟

5 ـ كيف يمكن تعيين كثافة جسم غير منتظم الشكل إذا كان هذا الجسم (أ) يغوص في الماء ؟ (ب) يطفو على الماء ؟

6 ـ قدر متوسط كثافة جسم الإنسان . كيف يمكنك قياس كثافة جسمك بدقة قدرها 1 في المائة باستخدام معدات بسيطة في حمام سباحة ؟ يطفو بعض الناس على الماء بسهولة أكثر من غيرهم . اشرح العوامل المتعلقة بذلك ؟

7 ـ كيف تطفو السفينة المصنوعة من الصلب على الماء ؟ ألا يغوص الصلب دائمًا في الماء ؟ كيف تنتقل الغواصة إلى الأعماق المختلفة ؟

8 ـ كوب مملوء إلى حافته بالماء وبه مكعب من الثلج يطفو جزئيًا فوق الماء . هل يطفح الماء من الكوب عندما ينصهر مكعب الثلج ؟

9 ـ وضعت كأس زجاجية مملوءة إلى حافتها بالماء على ميزان ثم وضع قالب خشبي في الماء فطفا على سطحه ، وعندئذ طفح بعض الماء خارج الكأس ونشف بقطعة من القماش وفي النهاية ظلت الكأس مملوءة إلى حافتها . قارن قراءتي الميزان الابتدائية والنهائية .

10 ـ يحتوي الدم على كثير من العوالق الدقيقة التي لا يمكن رؤيتها بالميكروسكوب ، وتستخدم قياسات معدل الترسيب لمعرفة ما إذا كانت هذه الدقائق متكتلة في مجموعات أم لا . اشرح كيف يمكن تحقيق ذلك وناقش الفروض التي تضعها .

11 ـ لماذا لا يستخدم الناس البارومترات المائية مع أن الزئبق مادة سامة وغالية الثمن ؟

12 ـ من الممكن أن نتخيل أن جزيئات الغاز المثالي تعمل ككرات دقيقة في حالة حركة مستمرة ، وكذلك يمكن وجود غاز مثالي مكون من جسيمات ذات حجم غروي . ولكن الكريات الزجاجية والكرات العادية لا تسلك سلوك الغاز المثالي . أين يقع الخط الحجمي الفاصل بين النوعين وبماذا يتحدد ؟

13 ـ يتغير تركيب الهواء مع الارتفاع ، فكلما زاد الارتفاع زادت النسبة المئوية لجزيئات الهيدروجين وقلت النسبة المئوية لجزيئات النيتروجين . لماذا ؟

مسائل

افترض أن الضغط الجوي 101 kPa مالم ينص على غير ذلك .

القسمان 1–9 و 2–9

1 ـ كرة مصمتة مصنوعة من مادة معينة نصف قطرها 3.0 cm وكتلتها 98.0 g ما هي كثافة مادة الكرة ؟

2 ـ مكعب مصمت طول ضلعه 2.0 cm وكتلته 24 g . ما هي كثافة المكعب ؟

3 ـ ما هي القيمة التقريبية لكتلة الهواء الموجود في غرفة على هيئة صندوق حجمه $6.0 \times 5.0 \times 2.5\ m^3$ عند 20°C ؟

4 ـ قارورة كتلتها فارغة تساوي 220 g ، وكتلتها وهي مملوءة بالماء 340 g ، وكتلتها وهي مملوءة ببلازما الدم 344 g . ما هي كثافة البلازما ؟

5 ـ ما كتلة مكعب من الثلج طول ضلعه 4.0 cm ؟

6 ـ أمر ملك بصناعة تاج له من الذهب الخالص كتلته 2.00 kg ، وعندما وصل التاج شك الملك في نقائه فأمر بقياس حجمه فوجد أنه $190\ cm^2$. هل التاج مصنوع من الذهب الخالص ؟

▪ 7 ـ إذا كان التاج في المسألة 6 مصنوعًا من خليط من النحاس الأصفر والذهب ، فما هي النسبة المئوية للذهب الخالص في التاج ؟

▪ 8 ـ كثافة النجم النيوتروني $1 \times 10^{19}\ kg/m^3$. ما قيمة نصف قطر الأرض إذا كانت كثافتها تساوي كثافة النجم النيوتروني ؟ كتلة الأرض $M_e = 5.98 \times 10^{24}\ kg$.

9 ـ لتعيين كثافة سائل مجهول تملأ قارورة حجمها $100\ cm^3$ وكتلتها 56.5 g بهذا السائل ثم توزن بالسائل . فإذا كانت كتلة السائل الذي يملأ القارورة 231.3 g ، ما كثافة هذا السائل ؟

10 ـ استخدمت طالبة مخبارًا مدرجًا حجمه $50.0\ cm^3$ وكتلته $36.7\ g$ لتعيين القيمة التقريبية لكثافة حجر كتلته $52.2\ g$. وضعت الطالبة الحجر في المخبار ثم صبت فيه الماء حتى وصل سطح الماء إلى العلامة $50.0\ cm^3$. فإذا كانت الكتلة الكلية للنظام $130.0\ g$ ، فما هي كثافة الحجر ؟

11 ـ إذا كان سعر الفضة $\$150,00/kg$ ، ما طول ضلع مكعب من الفضة ثمنه 1 مليون دولار (كثافة الفضة $10.5 \times 10^3\ kg/m^3$) ؟

12 ـ طبقة جيولوجية مائية على هيئة صندوق مستطيل أبعادها $2.0\ m \times 1.8\ m \times 30\ cm$. أوجد وزن الماء داخل الطبقة . (إهمل أبعاد الغطاء الخارجي) .

القسم 9-3

13 ـ علق حمل كتلته $7.2\ kg$ في سلك طوله $3.2\ m$ ونصف قطره $0.36\ mm$ فاستطال السلك بمقدار $1.58\ mm$. ما هو معامل يونج لمادة السلك ؟

14 ـ سبب حمل قدره $24\ kg$ استطالة سلك من الصلب طوله $160\ cm$ ونصف قطره $0.56\ mm$. ما مقدار استطالة السلك تحت تأثير هذا الحمل ؟

15 ـ عمود أسطواني من الألمنيوم ارتفاعه $6.0\ m$ ونصف قطره $30\ cm$. إذا وضع على قمة هذا العمود تمثال كتلته $2200\ kg$ ، ما مقدار انضغاط العمود ؟

16 ـ يستخدم عمود من الصلب طوله $6.0\ m$ ونصف قطره $2.0\ cm$ في حمل جزء من كوبري ، وقد صمم العمود بحيث لا يستطيل بأكثر من $6 \times 10^{-5}\ m$. ما أكبر حمل يستطيع العمود أن يتحمله ؟

17 ـ ما مقدار القوة اللازمة لضغط مكعب من النحاس الأصفر طوله ضلعه $3.0\ cm$ إلى 99.8 في المائة من ارتفاعه الأصلي ؟ (افترض أن المكعب ينضغط في اتجاه واحد فقط) .

18 ـ ما مقدار القوة اللازمة لضغط المكعب السابق وصفه في المسالة 17 إلى 99.8 في المائة في الأبعاد الثلاثة كلها ؟

19 ـ وضع مكعب من الجيلاتين طول ضلعه $4.0\ cm$ تحت تأثير قوة قاصة قدرها $0.50\ N$ على سطحه العلوي فأزيح هذا السطح بمقدار $2.7\ mm$. ما قيمة معامل القص للجيلاتين ؟

20 ـ ما مقدار الزيادة في الضغط اللازمة لإنقاص حجم عينة من الماء بمقدار 2 في المائة ؟

21 ـ انكمش قالب من المطاط الرغوي بمقدار 12 في المائة عندما تعرض لضغط قدره $1000\ kPa$. ما هو معامل المرونة الحجمية للمطاط ؟

22 ـ ينكسر الصلب إذا زاد الإجهاد القصي عن حوالي $4.0 \times 10^5\ kPa$. عين القيمة الصغرى لقوة القص اللازمة لخرم ثقب نصف قطره $1\ cm$ في لوح من الصلب سمكه $1.0\ cm$.

القسمان 9-4 و 9-5

23 ـ الضغط الجوي يساوي $100\ kPa$ تقريبًا . ما قيمة التغير النسبي في حجم كرة زجاجية عند تفريغ الهواء من حولها داخل غرفة تفريغ ؟

24 ـ بأي مقدار يجب زيادة الضغط عن الضغط الجوي لكي يقل حجم الزئبق بمقدار 0.1 في المائة ؟

25 ـ لنفرض أن هناك فراغًا مثاليًا داخل علبة قهوة معلقة بإحكام . ما مقدار القوة المؤثرة على غطاء العلبة ، وقطره $8.0\ cm$ ، عند تعرض العلبة للجو ؟ اعتبر أن $P_a = 100\ kPa$.

26 ـ بأي قوة يؤثر الجو على ظهر رجل ؟ افترض أن $P_a = 100\ kPa$ وأن مساحة ظهر الرجل حوالي $320\ cm^2$. لماذا لا تسحق هذه القوة الهائلة ذلك الشخص ؟

27 ـ ما قيمة ضغط الماء في قاع بحيرة عمقها $12\ m$ ؟ قارن هذه القيمة بالضغط الجوي وقدره $100\ kPa$ تقريبًا .

28 ـ ما قيمة الضغط المطلق عند قاع البحيرة المذكورة فى المسألة 27 ؟

29 ـ ما مقدار ضغط الزئبق عند قاعدة عمود من الزئبق ارتفاعه 765 mm . قارن هذا الضغط بالضغط الجوى وقدره 100 kPa تقريبًا ؟

■ 30 ـ يزيد الضغط فى ماسورة مياه بالطابق الأرضى لمبنى عال عن الضغط الجوى بمقدار 2.8×10^5 Pa. وإذا كان الضغط فى نفس الماسورة بالطابق العلوى يساوى 1.2×10^5 Pa فقط ، فما ارتفاع المبنى ؟

■ 31 ـ (أ) ما ضغط الماء على عمق 1600 m تحت سطح المحيط ؟ اعتبر أن كثافة ماء البحر $1025\ kg/m^3$. (ب) إذا كان معامل المرونة الحجمية لماء البحر والماء النقى متساويين ، بأى نسبة مئوية تزيد كثافة الماء على هذا العمق عن كثافته عند السطح ؟

■ 32 ـ سيارة كتلتها 1250 kg تحملها أربع عجلات مدلول ضغط القياس فى إطاراتها 180 kPa . ما مساحة سطح تلامس كل إطار مع رصف الطريق ؟ افترض أن نصيب العجلات من الحمل متساوى .

■ 33 ـ مدلول ضغط القياس عند قاع خزان خمسة أمثال قيمته على عمق 1.2 m . ما عمق الخزان ؟

■ 34 ـ وعاء يحتوى على طبقة من الزيت سمكها 12 cm تطفو على 25 cm من الماء . إذا كانت كثافة الزيت $850\ kg/m^3$ ، ما هو الضغط الكلى نتيجة للسائلين عند قاع الوعاء ؟

35 ـ أنبوبة زجاجية على شكل الحرف U كالمبينة بالشكل 15-9 . صب الماء فى الأنبوبة حتى وصل إلى ارتفاع قدره 12 cm فى الفرعين . بعدئذ أضيف الكيروسين ($\rho = 870\ kg/m^3$) ببطئ فى أحد الفرعين إلى أن ارتفع الماء فى الفرع الآخر بمقدار 5 cm . ما طول عمود الكيروسين ؟

36 ـ افترض فى المسألة السابقة أننا صببنا طولاً قدره 3.0 cm من البنزين فى أحد الفرعين . بأى قدر سوف يرتفع عمود الماء ؟

37 ـ إذا كان طول عمود الزئبق فى بارومتر 74.6 cm ، ما قيمة الضغط الجوى ؟

38 ـ تؤثر آلات التشكيل بالكبس الهيدروليكية بقوى هائلة على الألواح المعدنية لتشكيلها فى الصورة المطلوب . لنفرض أن دخل القوة المؤثر على كباس قطره 1.80 cm يساوى 900 N ، وأن خرج القوة يؤثر على كباس قطره 36 cm . ما مقدار القوة التى يؤثر بها الكباس على اللوح الجارى تشكيله ؟

■ 39 ـ إذا كانت مساحة مقطع كباس إبرة للحقن تحت الجلد $0.76\ cm^2$ ، ما مقدار القوة التى يجب تسليطها على الكباس إذا أريد حقن سائل فى وريد يزيد الضغط فيه عن الضغط الجوى بمقدار 18.6 kPa .

40 ـ حبست كمية من الماء داخل إناء قوى باستخدام كباس مساحة مقطعه $0.60\ cm^2$. ما مقدار القوة اللازم تسليطها على الكباس بحيث تزيد كثافة الماء بمقدار 0.01 فى المائة ؟

41 ـ افترض أن بارومترًا مائيًا قد استخدم لقياس الضغط الجوى . ما طول عمود الماء فى يوم يقرأ فى بارومتر زئبقى 76 cm ؟

■ 42 ـ الضغط الجوى فى دنفر ، وهى مدينة ترتفع ميلاً عن سطح البحر ، يساوى 60 cmHg فقط . ما طول عمود الزيت (وكثافته $879\ kg/m^3$) الذى يستطيع هذا الضغط أن يحمله ؟

43 ـ بأى قوة يضغط الجو إلى أسفل على كتاب أبعاده 28 cm × 20 cm موضوع على منضدة عندما يكون الضغط الجوى 100 kPa ؟ وإذا كانت كتلة الكتاب 2.1 kg ، ما نسبة هذه القوة إلى وزن الكتاب ؟

■ 44 ـ بأى قوة يؤثر الجو على سطح كرة قطرها 24 cm ؟ افترض أن الضغط الجوى 98 kPa .

القسم 9-6

45 ـ مكعب من المعدن طول ضلعه 2.0 cm . ما مقدار قوة الطفو المؤثرة عليه عندما يكون مغمورًا كليًا فى زيت كثافته $864\ kg/m^3$ ؟

46 ـ جسم كتلته 2.40 g ، وكتلته الظاهرية 1.62 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الماء عند $20^{\circ}C$. (أ) ما حجم الجسم ؟ (ب) ما كثافته ؟

47 ـ جسم كتلته 6.24 g ، وكتلته الظاهرية 5.39 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الزيت . أوجد كثافة الزيت إذا كانت كثافة الجسم $6.4\ g/cm^3$.

48 ـ جسم كتلته 4.923 g ، وكتلته الظاهرية 2.241 g عندما يكون مغمورًا كليًا فى الماء . فإذا كانت الكتلة الظاهرية للجسم عندما يكون مغمورًا كليًا فى زيت معين ، فما هى كثافة هذا الزيت ؟

49 ـ لكى تظل امرأة وزنها 480 N مغمورة كليًا فى الماء يجب أن تؤثر عليها قوة رأسية إلى أسفل مقدارها 18 N . ما كثافة جسم هذه المرأة ؟

50 ـ قالب من البلاستيك الرغوى حجمه $25\ cm^3$ وكثافته $800\ kg/m^3$. ما مقدار القوة اللازمة لغمره تحت الماء ؟

51 ـ يطفو قالب من مادة مجهولة على سطح الماء بحيث كان 25 فى المائة من حجمه ظاهرًا على السطح . ما كثافة مادة القالب ؟

52 ـ تتكون الجبال الجليدية من ماء نقى كثافته $920\ kg/m^3$ ، وكثافة ماء المحيط الذى تطفو عليه هذه الجبال تساوى $1.03 \times 10^3\ kg/m^3$ تقريبًا . ما هى النسبة التى تختفى تحت سطح الماء من الجبل الجليدى ؟

■ 53 ـ رمث* مساحته $6\ m \times 4\ m$ يطفو على سطح نهر . وعندما وضعت عليه سيارة غطس منه سمك قدره 3.0 cm فى الماء . ما وزن السيارة ؟

■ 54 ـ ما هو أصغر حجم لقالب من مادة (كثافتها $810\ kg/m^3$) يستطيع أن يحفظ رجلاً كتلته 64 kg فوق سطح الماء تمامًا فى بحيرة عندما يقف هذا الرجل على القالب ؟

■ 55 ـ عندما وضع كأس مملوء جزئيًا بالماء على ميزان دقيق قرأ الميزان 22 g . فإذا وضعت قطعة من الخشب كثافتها $905\ kg/m^3$ وحجمها $2.1\ cm^3$ طافية على الماء فى الكأس ؛ فماذا يقرأ الميزان ؟

■ 56 ـ عندما وضع كأس مملوء جزئيًا بالماء على ميزان دقيق قرأ الميزان 22 g . فإذا علقت قطعة من المعدن كثافتها $3800\ kg/m^3$ وحجمها $2.4\ cm^3$ باستخدام خيط دقيق بحيث كانت مغمورة تمامًا فى الماء دون أن تمس قاع الكأس ، ماذا ستكون قراءة الميزان ؟

■ 57 ـ يراد وزن قالب من البلاستيك الرغوى كثافته $600\ kg/m^3$ وحجمه $240\ cm^3$ مع قطعة من الألمنيوم بحيث يغطس القالب بالكاد فى الماء . ما كتلة قطعة الألمنيوم اللازم تعليقها فى القالب ؟

■ 58 ـ مكعب من المعدن (كثافته $6 \times 10^3\ kg/m^3$) به فجوة بداخله . فإذا كان وزن المكعب فى الهواء 2.4 ضعفا قدر وزنه وهو مغمور كليًا فى الماء ، فما هى النسبة الحجمية للفجوة الموجودة داخل المكعب ؟

القسم 7-9

59 ـ بأى معامل يتغير معدل انسياب سائل فى أنبوبة شعرية إذا تضاعف طولها خمس مرات وتضاعف نصف قطرها ثلاث مرات ؟ افترض أن فرق الضغط عبر طرفى الأنبوبة لا يتغير .

60 ـ استبدلت إبرة محقن تحت جلدى طولها ثلثا الطول الأصلى وقطرها ثلث القطر الأصلى . بأى معامل يجب أن يتغير فرق الضغط عبر الإبرة إذا كان معدل الانسياب ثابتًا ؟

■ 61 ـ إبرة محقن تحت جلدى طولها 3.6 cm وقطرها الداخلى 0.24 mm ومساحة مقطع كباسها $0.084\ cm^2$. إذا كانت القوة المؤثرة على الكباس 6.4 N ، ما هو معدل انسياب الماء خلال الإبرة عند $30^{\circ}C$ ؟

---

* الرمث (أو الطوف) خشب يشد بعضه إلى بعض ويركب فى البحر أو النهر .

■ 62 ـ تستخدم إبرة طولها 4.0 cm ونصف قطرها الداخلى 0.3 mm لنقل الدم . ولخلق فرق الضغط عبر الإبرة ترفع قنينة الدم بمقدار 1 m فوق ذراع المريض . فإذا كان ضغط الدم فى وريد المريض 10 mmHg ؛ (أ) ما معدل انسياب الدم خلال الإبرة ؟ (ب) ما الزمن اللازم لحقن 1 liter من الدم فى الوريد ، إذا كان معدل الانسياب ثابتًا بهذه القيمة ؟ كثافة الدم $1050\ kg/m^3$ ومعامل لزوجته 4×10^{-3} Pa .

■ 63 ـ ضغط دم أحد الأشخاص 125/85 mmHg ومتوسط ضغط الدم حوالى 105 mmHg ، وهو ما يعادل 1.40×10^4 Pa تقريبًا . افترض أن إبرة حقن طولها 4.0 cm ونصف قطرها 0.3 mm قد أدخلت فى وريد ضغط الدم فيه يساوى هذه القيمة المتوسطة . بأى معدل سوف يتدفق الدم من الإبرة ؟ استخدم $\eta_{blood} = 4$ mPl .

■ 64 ـ قالب مكعب الشكل طول ضلعه 3.0 cm يستقر على لوح مستو وبينهما طبقة من الزيت سمكها 0.04 mm ($\eta_{oil} = 0.40$ mPl) ما هى القوة اللازمة لشد القالب على اللوح بسرعة مقدارها 0.3 m/s ؟

■ 65 ـ يتناقص ضغط الماء فى ماسورة أفقية عند 20°C بمعدل قدره 60 kPa لكل 100 m عندما ينساب الماء فيها بمعدل 3.0 liter/min . ما مقدار نصف قطر الماسورة ؟

القسمان 9-8 و 9-9

66 ـ يتسرب الماء من ماسورة قريبة من قاع خزان ضخم لتخزين الماء على هيئة تيار من الماء مندفع منها . فإذا كان سطح الماء فى الخزان يقع على ارتفاع 10 m من نقطة التسرب ، (أ) بأى سرعة يندفع الماء من الفتحة ؟ (ب) إذا كانت مساحة الفتحة $0.08\ cm^2$ ، فما هى كمية الماء المتدفقة منها فى 1 min ؟

67 ـ ينساب الماء داخل نظام مغلق من المواسير ، وكانت سرعة الماء عند إحدى النقط 2.8 m/s بينما كانت سرعته 4.2 m/s عند نقطة أخرى ترتفع عن الأولى بمقدار 4.0 m . (أ) ما مقدار الضغط عند النقطة العليا إذا كان مقداره 84 kPa عند النقطة السفلى ؟ (ب) ما هو الضغط عند النقطة العليا إذا كان الماء يتوقف عن الانسياب عندما يكون الضغط عند النقطة السفلى 62 kPa ؟ افترض أن هذه الضغوط جميعها هى الضغوط المطلقة .

68 ـ صمم جناح طائرة بحيث تكون سرعة الهواء تحت الجناح 300 m/s عندما تكون سرعته عبر السطح العلوى 360 m/s . ما هو فرق الضغط بين السطحين العلوى والسفلى للجناح ؟

69 ـ إذا كانت مساحة الجناح فى المسألة 68 تساوى $20\ m^2$ ؛ ما قيمة صافى القوة المؤثرة على الجناح ؟

70 ـ أنبوبة أفقية قطرها 4.0 cm تتصل بأنبوبة أخرى قطرها 3.0 cm ، وكان فرق الضغط بين الأنبوبتين 7.2 kPa . (أ) فى أى الأنبوبتين يكون الضغط أكبر مما فى الأخرى ؟ (ب) ما حجم الماء المتدفق فى الأنبوبتين فى الدقيقة ؟

71 ـ يندفع الماء من فوهة رشاش الحديقة رأسيًا إلى أعلى ويصل إلى ارتفاع قدره 5 m . ما مدلول ضغط المقياس فى الفوهة ؟

■ 72 ـ يتدفق الدم (وكثافته $1050\ kg/m^3$) بسرعة مقدارها 30 cm/s فى الأورطى . فإذا كانت مساحة مقطع الأورطى $1.6\ cm^2$ ، فما معدل تدفق الدم فيه بالكيلوجرامات فى الثانية ؟ وبعد أن يتفرع الأورطى فإنه يتحول إلى عدد كبير من الشعيرات الدقيقة مساحة مقطعها الإجمالية $2.0 \times 10^3\ cm^2$. ما سرعة تدفق الدم فى هذه الشعيرات ؟

■ 73 ـ سيارة ارتفاعها 1.8 m وارتفاع نموذجها المصغر 18.0 cm . إذا اختبر هذا النموذج فى نفق الرياح . فبأى سرعة يجب أن يتحرك الهواء على النموذج لمحاكاة حركة السيارة الفعلية بسرعة مقدارها 80 km/h ؟

■ 74 ـ إثبت أن عدد رينولدز يمكن كتابته على الصورة $N_R = 2Q\rho/\pi\eta r$ فى حالة انسياب سائل فى ماسورة أسطوانية نصف قطرها r .

75 ـ بأي سرعة يمكن أن تسقط قطرة من الماء قطرها 3.6 mm في الوعاء قبل أن يبدأ الانسياب المضطرب ؟ اعتبر أن $N_R = 10$.

76 ـ عين سرعة تدفق الماء خلال أنبوبة قطرها 1.0 cm عندما يصبح الانسياب مضطربًا . اعتبر أن $N_R = 3000$.

القسم 10-9

77 ـ ما مقدار السرعة النهائية لقطرة من الماء قطرها 4.0 mm تسقط في الهواء بفرض أن قانون ستوكس ينطبق على هذه الحالة ؟ هل ينطبق قانون ستوكس فعلاً على هذا الموقف ؟

78 ـ السرعة النهائية لكرات مصمتة صغيرة قطرها 1 mm أثناء سقوطها في الماء تساوى 1.2 cm/s . ما كثافة الكرات ؟

79 ـ سقطت قطرة من الزيت (كثافته $850\ kg/m^3$) في الهواء فوجد أن سرعتها النهائية 0.05 mm/s . عين نصف قطر القطرة إذا علمت أن كثافة الهواء $1.29\ kg/m^3$ ولزوجة الهواء $\eta_{air} = 0.019$ mPl .

80 ـ تسقط كرة من الألمنيوم نصف قطرها 0.4 mm في ماء درجة حرارته 30°C . أوجد (أ) قوة الطفو المؤثرة على الكرة ، (ب) السرعة النهائية للكرة . افترض أن الانسياب طبقي .

81 ـ أوجد النسبة بين معدلات ترسيب خليط من الكرات الصغيرة المصنوعة جميعها من نفس المادة والنسبة بين أقطارها 3 : 2 : 1 .

■ 82 ـ شكلت قطعة من الخشب (كثافته $\rho = 840\ kg/m^3$) في صورة كرة نصف قطرها 0.6 cm . حررت هذه الكرة من موضع عميق في بحيرة فبدأت في الارتفاع إلى السطح . بفرض أن الانسياب طبقي ، ما قيمة السرعة النهائية للكرة أثناء حركتها ؟ هل الفرض بأن الانسياب طبقي فرض مبرر ؟

مسائل إضافية

■■ 83 ـ لصقت شريحة من المطاط سمكها 3.2 mm بين لوحين معدنيين متوازيين مساحة كل منهما تساوى مساحة سطح الشريحة وقدره 10.0 cm × 10.0 cm . طبق إجهاد قصي على المطاط بشد اللوحين في اتجاهين متضادين بقوة قدرها 45 N . ما مقدار إزاحة أحد اللوحين بالنسبة إلى الآخر إذا كان معامل قص المطاط 1.20 MPa ؟

■■ 84 ـ جذب قالب كتلته 10 kg على سطح أفقي باستخدام سلك من الصلب نصف قطره $2.0\ mm^2$. إذا كان الاحتكاك مهملاً ، فما هي أكبر عجلة يمكن أن يكتسبها القالب ؟ مقاومة شد الصلب 0.50 GPa .

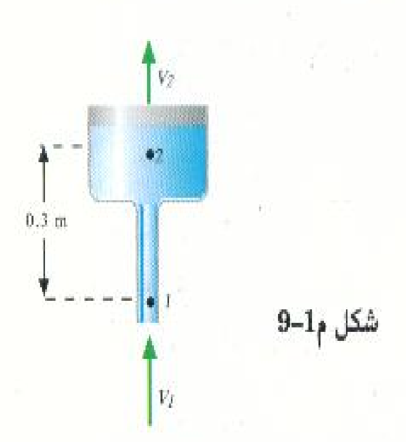
■■ 85 ـ سقطت سيارة مغلقة النوافذ من فوق كوبري فوقعت في النهر ، وعندما وصلت السيارة إلى السكون كان مركز باب السائق على عمق قدره 3.6 m تحت سطح الماء . ما هي القوة التي يجب أن يؤثر بها السائق على الباب حتى يتمكن من فتحه ؟ مساحة الباب حوالى $0.9\ m^2$.

■■ 86 ـ في مرفاع السيارات الهيدروليكي يستخدم الهواء المضغوط في تسليط قوة معينة على كباس صغير نصف قطره 4 cm ، ويستخدم هذا الضغط في رفع سيارة وزنها 12,000 N على كباس آخر نصف قطره 20 cm . ما قيمة ضغط الهواء على الكباس الصغير اللازم لرفع السيارة ؟

■■ 87 ـ يستخدم مانومتر زئبقي لمراقبة الضغط في غرفة التفاعلات الكيميائية ، وكان مستوى سطح الزئبق في الفرع المفتوح على الهواء أعلى من مستواه في الفراع المتصل بالغرفة بمقدار 2.83 cm عندما كانت قراءة البارومتر 74.82 cmHg . ما قيمة الضغط داخل غرفة التفاعلات ؟

■■ 88 ـ استخدم مانومتر زيتي (كثافة الزيت $864\ kg/m^3$) لقياس الضغط داخل غرفة للاختبارات البيئية ، وكان مستوى سطح الزيت في الفرع المفتوح على الهواء أعلى من مستواه في الفرع المتصل بالغرفة بمقدار 11.6 cm . فإذا كانت قراءة البارومتر 74.23 cmHg ، ما قيمة الضغط داخل الغرفة ؟

89 ـ (أ) ينساب الماء داخل نظام المواسير الموضح بالشكل م1-9 إلى أعلى ، وكان نصفا قطرى الماسورة r_1 ، r_2 عند النقطتين 1 و 2 على الترتيب . فإذا كان مقدار سرعة الماء 30 cm/s عند النقطة 1 ، ما قيمة فرق الضغط $P_2 - P_1$ بين هاتين النقطتين ؟ (ب) كرر المسألة إذا كان الانسياب في الاتجاه المعاكس .



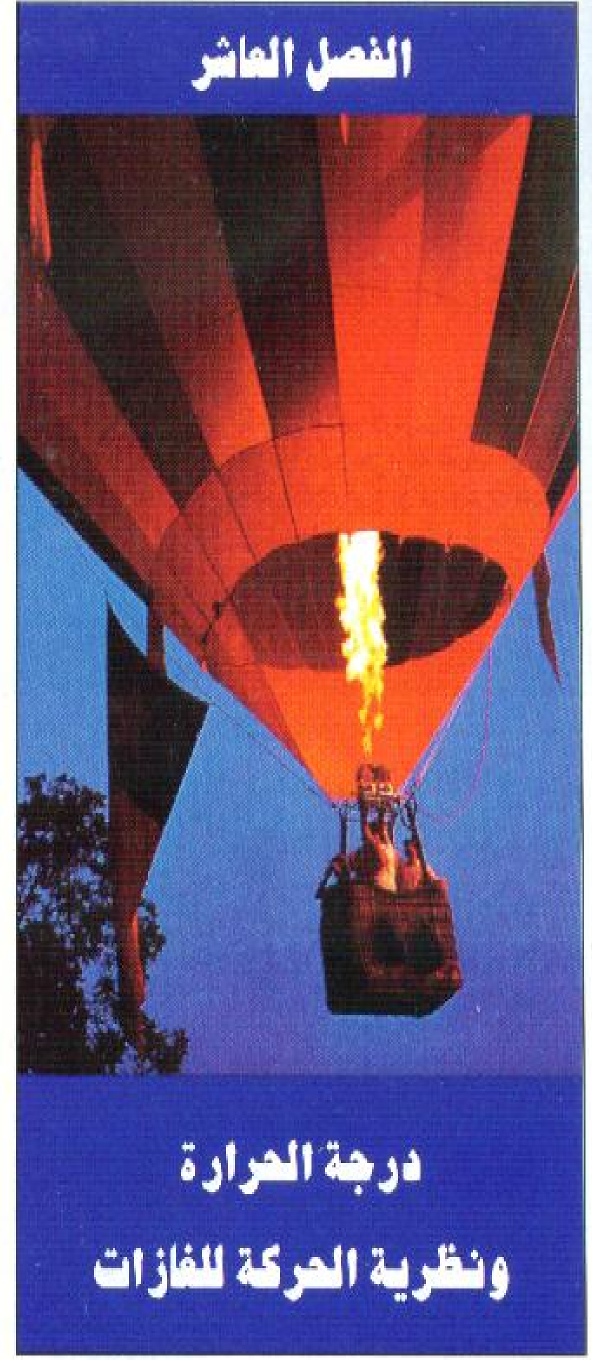
شكل م1-9

90 ـ استخدم سلك رفيع دقيق فى رفع كرة من الألمنيوم نصف قطرها b بسرعة ثابتة v خلال سائل كثافته ρ ولزوجته η . أوجد الشد فى السلك .

91 ـ ينطلق الماء من فوهة خرطوم مطافئ بمعدل قدره $0.02\ m^3/s$ ، وعندما وجهت الفوهة إلى أعلى وصل الماء إلى ارتفاع قدره 32 m . لنفرض أن الخرطوم كان فى وضع أفقى فوق الأرض عندما حاول رجل المطافئ توجيه فوهته رأسيًا إلى أعلى . صف القوة الأفقية التى يجب أن يؤثر بها رجل المطافئ على الفوهة لكى يحتفظ بها ساكنة .

92 ـ عند استخدام مانومتر كحولى على شكل حرف U لقياس ضغط غاز معين فى وعاء مغلق وجد أن الفرق بين ارتفاعى الكحول هو $h_1 - h_2 = 80$ cm عندما كان الطرف 1 مفتوحًا على الغرفة والطرف 2 متصلاً بالغاز . كما وجد أن بارومترًا زئبقيًا فى نفس الغرفة يعطى قراءة قدرها 740 mm . ما قيمة كل من مدلول ضغط القياس والضغط المطلق للغاز بالتور والوحدات SI ؟

93 ـ عندما يملأ كيس بالون بغاز الهليوم فإنه يصبح على شكل كرة قطرها 40 m ، ما هو الوزن الكلى ، بما فيه الكيس والجندول والمحتويات ، الذى يستطيع البالون رفعه فى الهواء عند معدل الضغط ودرجة الحرارة ؟ وإذا أريد أن يرفع البالون وزنًا أكبر من ذلك فهل ينتظر يومًا أكثر برودة أم أكثر دفئًا ؟

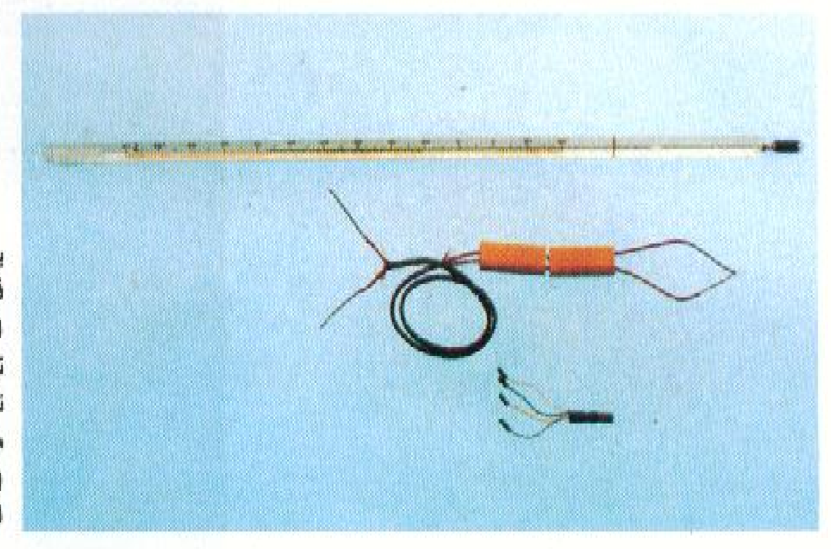


تعرفنا فى الفصل التاسع على طريقة قياس ضغط الغاز ، كما ناقشنا بعض خواص الغازات المنسابة . وسوف نوجه اهتمامنا الآن إلى مفهوم درجة الحرارة واعتماد ضغط الغاز على درجة الحرارة . علاوة على ذلك فإننا سوف نقوم باشتقاق تفسير فيزيائى أساسى لدرجة الحرارة بدلالة طاقة حركة ذرات الغاز أو جزيئاته . ويسمى النموذج الجزيئى المستخدم للحصول على هذه العلاقة **بنظرية الحركة للغازات** . لنبدأ أولاً بمناقشة درجة الحرارة بالأسلوب المألوف المرتبط بخبرتنا مع الترمومترات .

10-1 الترمومترات ومقاييس درجة الحرارة

درجة الحرارة ، كما ذكرنا فى الفصل الأول ، واحدة من الأبعاد الأساسية السبع فى الفيزياء . وبالرغم من أننا لن نعطى التعريف الرسمى الصارم لدرجة الحرارة قبل الفصل الثانى عشر ، فإنه يمكننا أن نقول بمنتهى البساطة هنا أن درجة الحرارة مقياس « لسخونة » أو « برودة » أى جسم . والدليل المألوف على أن ضغط الغاز يعتمد على درجة الحرارة هو أن ضغط الهواء فى إطارات السيارة الساخنة يكون أكبر من قيمته فى الإطارات الباردة . كذلك فإن درجة الحرارة تؤثر على حياتنا بطرق عديدة أخرى . فنحن نعتمد مثلاً على القياسات الدقيقة لدرجة حرارة الجو فى اختيار ملابسنا صيفًا أو

شتاء وكذلك فى تدفئة أو تبريد مساكننا بما يتناسب مع درجة الجو المعلنـة فـى تقارير الطقس . وتسـمى الأجهـزة المسـتخدمة لقياس درجـة الحـرارة **بالترمومـترات** . هـذه الأجهزة كثيرة ومتنوعة ، كما يمكن معايرتها طبقًا لمقاييس درجة الحرارة المختلفة .

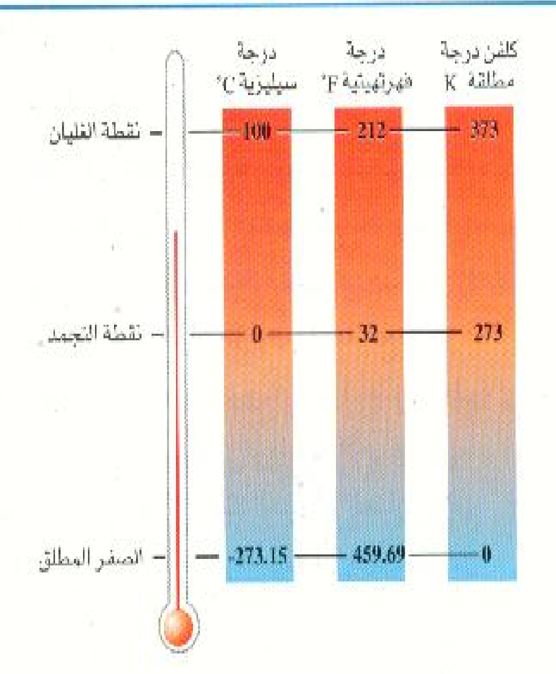


يمكن أن تستخدم الترمومترات أى خاصية فيزيائية تعتمد على درجة الحرارة . وتوضح الصورة ثلاثة أنواع من الترمومترات التى تستخدم (1) التمدد الحرارى للسائل ، (2) تغير الفلطية عند وصلة من فلزين مختلفين مع درجة الحرارة (الازدواج الحرارى) ، (3) اعتماد المقاومة الكهربائية على درجة الحرارة (ترمومتر المقاومة) .

يمثل الشكل 1–10 أكثر أنواع الترمترات استعمالاً وانتشارًا . ويتركب هذا الجهاز أساسًا من أنبوبة شعرية زجاجية مغلقة يتصل أحد طرفيها ببصيلة تعمل كخزان لسائل ترمومترى كالزئبق أو الكحول . وحيث أن هذه السوائل تتمدد بزيادة درجة الحرارة فإن مستوى السائل فى الأنبوبة الشعرية سوف يرتفع بارتفاع درجة الحرارة . (يتمدد الزجاج أيضًا عندما ترتفع درجة الحرارة ، ولكن بدرجة أقل كثيرًا من السائل) . ويقسم الترمومتر بعلامات إلى أقسام بالطريقة الآتية :

تعلم على الترمومتر نقطتان مرجعيتان . النقطة الأولى تمثل موضع مستوى سطح السائل فى الأنبوبة الشعرية عندما يكون الترمومتر فى درجة حرارة خليط من الثلج والماء فى حالة الاتزان عند الضغط الجوى القياسى ؛ وهذا هو مستوى التجمد فى الشكل 1–10 . أما النقطة المرجعية الثانية فهى موضع مستوى سطح السائل فى الأنبوبة الشعرية عندما يكون الترمومتر فى نقطة غليان الماء (تحت الضغط الجوى القياسى) ؛ وهذا هو مستوى الغليان فى الشكل .

القياسان (أو التدريجان) المستخدمان غالبًا فى الحياة اليومية بالولايات المتحدة لقياس درجة الحرارة هما مقياسا **سلزيوس وفهرنهيت** . أما مقياس سلزيوس الذى اقترحه العالم السويدى أندرس سلزيوس عام 1742) فإنه يضع نقطة تجمد الماء النقى عند $0°C$ (درجة سليزية) ونقطة الغليان عند $100°C$ مع ملاحظة أن هاتين الظاهرتين مقاستان عند الضغط الجوى القياسى . ومن ثم يوجد بين النقطتين المرجعيتين مائة درجة ، ولهذا يسمى هذا المقياس أحيانًا بالمقياس المئوى (وقد سبق للفيزيائى الألمانى جابرييل فهرنهيت أن اقترح نوعًا من المقاييس المئوية ، إذ اعتبر أن $0°F$ تناظر تجمد الماء المالح وأن $100°F$ تمثل درجة حرارة الجسم البشرى ؛



شكل 1-10 :
يمكن استخدام نقطتى غليان وتجمد الماء لإيضاح العلاقة المتبادلة بين مقاييس درجة الحرارة المعتادة الثلاثة .

والحقيقية أن درجة حرارة الجسم البشرى هى 98.6°F . ويلاحظ أن نقطتى تجمد وغليان الماء النقى على هذا المقياس هما 32°F و 212°F على الترتيب . وعليه فإن 180 درجة فهرنهيتية و 100 درجة سيليزية تغطى نفس المدى من درجات الحرارة ، ومن ثم فإن العلاقة بين مقدار (حجم) الدرجتين الفهرنهيتية والسيليزية هى 1°F = 100 / 180 = 5/9 °C . لاحظ أن الصيغة الأخيرة تمثل مدى معينا من درجات الحرارة ، بينما يعنى الرمزان °F و °C قراءة معينة لدرجات الحرارة .

المقياس الثالث لدرجات الحرارة هو **مقياس كلفن أو المقياس المطلق** ، وهو مقياس ذو أهمية عظمى يستخدم أساسًا فى المجال العلمى . ووحدة درجة الحرارة على هذا المقياس فى النظام SI هى الوحدة الأساسية وتسمى **كلفن (K)** . ويلاحظ هنا أن حجم درجة الحرارة الواحدة متساو على مقياس سلزيوس وكلفن ، فإذا تغيرت درجة بمقدار واحد كلفن (لا يقال درجة كلفن) فإن هذا يعنى تغيرها بمقدار 1°C . ومن الجدير بالذكر أن نقطتى تجمد وغليان الماء على هذا المقياس هما 273.15 K و 373.15 K على الترتيب . وهذا وسوف نرى هنا لماذا يعتبر مقياس كلفن مقياسًا ذا أهمية علمية أساسية .

هذه التعريفات التاريخية لمقاييس درجة الحرارة لم تعد سارية فى الوقت الحاضر ، وهذا ما سوف نراه فى القسم 12-10 . ومع ذلك فإن اختيار التعريفات الجديدة قد تم بحيث تظل هذه المقاييس كما هى أساسًا طبقًا للتعريفات الأصلية . ويمكننا أن نرى من الشكل 1-10 أن هناك علاقة بسيطة بين درجة الحرارة السيليزية T_C ودرجة الحرارة المطلقة (الكلفنية) T :

$$T = T_C + 273.15$$

وبالرغم من أننا لن نستخدم مقياس فهرنهيت فى هذا الكتاب ، فإنه يمكن تحويل قراءات درجة الحرارة على المقياس باستخدام المعادلتين :

$$T_C = (T_F - 32)(5/9)$$

$$T = 273.15 + ((T_F - 32)(5/9)$$

نحن نستعمل الترمومترات بشكل روتينى فى حياتنا اليومية . ومع ذلك فإن هناك قانونًا فيزيائيًا أساسيًا متعلقًا بها ربما لم نلاحظه حتى الآن . فعندما نضع الترمومتر فى حالة تلامس حميم مع جسم فإنه سرعان ما يصل إلى قراءة مستقرة تسمى درجة حرارة الجسم ، ويقال عندئذ أن الجسم والترمومتر فى حالة **اتزان حرارى** أحدهما مع الآخر . وإذا وضع هذا الجسم فى حالة تلامس مع جسم آخر ذى درجة حرارة أعلى سوف تتغير درجتا حرارة الجسمين باستمرار إلى أن يصل الجسمان فى نهاية الأمر إلى حالة اتزان حرارى عند درجة حرارة وسطية أخرى ، ويقال فى هذه الحالة أن الحرارة تنتقل من الجسم الأكثر سخونة إلى الجسم الأكثر برودة . هذه حقائق معلومة لنا جيدًا ، ولكن لنتأمل التجربة الهامة الآتية .

لنفرض أن ترمومترًا يقرأ نفس درجة الحرارة لجسمين ؛ ماذا يحدث حينما يوضع الجسمان فى حالة تلامس حميم أحدهما مع الآخر ؟ الإجابة هى : لن يحدث أى شىء ؛ ولن تتغير درجة حرارة أى من الجسمين . معنى ذلك أن الجسمين فى حالة اتزان حرارى مع بعضهما . إذن ، **الأجسام أو الأنظمة المتساوية فى درجة الحرارة تكون فى حالة اتزان حرارى مع بعضها البعض** . هذه العبارة الواضحة هى إحدى صور **القانون الصفرى للديناميكا الحرارية** الذى يمكن كتابته فى الصورة الآتية :

النظامان أو الجسمان الموجودان كل على حدة فى حالة اتزان حرارى مع جسم ثالث يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

وعليه ، تتساوى درجات حرارة الأجسام الموجودة فى حالة اتزان حرارى مع بعضها البعض .



تحتوى المجرات ، مثل هذه المجرة ، على مئات الملايين من النجوم . وهكذا فإن المول الواحد من النجوم يتكون من حوالى تريليون مجرة من هذا النوع .

10-2 المول وعدد أفوجادرو

سنناقش فى القسم التالى كيف يعتمد ضغط الغـاز علـى درجـة حرارتـه وكثافتـه . ولكـن تسهيلاً للمناقشة فإننا نحتاج إلى استخدام بعض المصطلحات التى تدرس عـادة فـى علـم الكيمياء . ونظرًا لأنه من المحتمل ألا تكون هذه المصطلحـات مألوفـة لـك ؛ لنقض الآن بعض الوقت فى مناقشتها .

يسمى عدد ذرات الكربون فى كتلة قدرها 12 g من الكربون* **بعدد أفوجادرو** N_A . وقـد أثبتت التجربة أن هذا العدد هو 6.02214×10^{23} ذرة لكل 12 g من الكربون ، ويسـتخدم هذا العدد فى تعريف مقياس لكمية أى مادة ، وهو الكمية المعروفة باسم المول (mol) :

المول من المادة هو كمية المادة التى تحتوى على عدد قدره N_A من الجسيمات .

فمثلاً : المول الواحد من كرات البسيبول يتكون من 6.022×10^{23} كـرة بيسـبول . وبـالمثل ، يحتوى المول الواحد من الماء على عدد قدره N_A من جزيئات الماء . وكما نرى فإن المـول ليس مقياسًا للكتلة ، ولكنه مقياس لعدد الكيانات . وتلخيصًا لما سبق يمكننا كتابة :

$$\text{عدد أفوجادرو} = N_A = 6.02214 \times 10^{23} \ \text{particles per mole}$$

وحيث أن وحدة الكتلة فى النظام SI هى الكيلو جرام ووحدة المادة هى الكيلـو مـول ، فإننا سوف نستبدل N_A بالقيمة المكافئة ، أى أن :

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23} \ \text{particles / mole}$$

من المهم أيضًا أن نتعرف على مصطلحين آخرين مرتبطين بالمول وهما **الكتلة الذريـة والكتلة الجزيئية** ، وسوف نرمز لكليهما بالرمز M :

الكتلة الجزيئية (أو الذرية) M من مادة ما هى كتلة الكيلـو مـول الواحـد مـن المـادة بالكيلو جرامات .

فمثلاً ، حيث أن 12 g من الكربون 12 تحتوى طبقًا للتعريف على N_A مـن الـذرات ، إذن 1 kmol من ^{12}C تكـون كتلتـه الذريـة $M = 12$ kg/kmol بـالضبط ، وكذلك فإن قيـم M التقريبية لبعض الأمثلة الأخرى هى : $M = 1$ kg/kmol للـهيدروجين ؛ $M = 32$ kg/kmol لغاز الأكسجين (O_2) ؛ $M = 18$ kg/kmol للماء (H_2O) ؛ $M = 28$ kg/kmol لغـاز النيتروجين . هذا ويمكنك أن تجد قيم M المضبوطة لجميع العناصر فى الملحقين 1 و 2 .

مثال توضيحى 10-1

الكتلة الذرية للنحاس 63.5 kg/koml . أوجد كتلة ذرية نحاس واحدة .

* فى 12 g من النظير carbon-12 بالتحديد .

استدلال منطقى : بما أن $M = 63.5\ kg/kmol$ ، إذن $63.5\ kg$ من النحاس تحتوى على 6.022×10^{26} من الذرات . وعليه فإن كتلة ذرة واحدة هى :

$$\text{الكتلة لكل ذرة} = \frac{63.5\ kg}{6.022\times10^{26}\ atoms} = 1.05\times10^{-25}\ kg/atom$$

ويمكن استخدام نفس هذه الطريقة لإيجاد كتلة أى ذرة أو جزئ بمعلومية M وحيث أن M كيلو جرامًا تحتوى على N_A كيانًا ، إذن :

$$\text{الكتلة لكل كيان} = \frac{M}{N_A}$$

تمرين : أوجد كتلة جزئ الأكسجين O_2 . **الإجابة** : 5.31×10^{-26} .

مثال 10-1 :

أوجد الحجم المرتبط بذرة زئبق فى الزئبق السائل علمًا بأن $\rho = 13{,}600\ kg/m^3$ و $M = 201\ kg/kmol$ للزئبق .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الفرض الذى يمكن استخدامه فيما يتعلق بتوزيع الذرات فى الزئبق السائل ؟

الإجابة : حيث أننا نتحدث عن الزئبق ، يمكننا أن نفرض أن الذرات « متلامسة » مع بعضها البعض . وهكذا فإن الحجم لكل ذرة يمكن حسابه بإيجاد النسبة بين الحجم الكلى لعينة ما والعدد الكلى للذرات فى هذه العينة .

سؤال : ما هى العينة الممكن إجراء الحسابات بالنسبة لها ؟

الإجابة : أنسب عينة هنا هى الكيلو مول الواحد لأننا نعلم أنها تحتوى على عدد قدره N_A من الذرات .

سؤال : كيف يمكن إيجاد حجم $1\ kmol$ ؟

الإجابة : نحن نعلم كثافة الزئبق وقيمة M للزئبق ، وعليه يمكن حساب عدد المليمترات المكعبة لكل كيلو مول من الزئبق . لاحظ أن :

$$\frac{\text{الحجم}}{kmol} = \frac{M(kg/kmol)}{\rho(kg/m^3)}$$

سؤال : كيف نوجد حجم الذرة الواحدة ؟

الإجابة : حجم الذرة الواحدة يساوى $1/N_A$ مضروبًا فى الحجم لكل كيلو مول .

الحل والمناقشة : بالتعويض بالقيم العددية :

$$\frac{\text{الحجم}}{kmol} = \frac{201\ kg/kmol}{1.36\times10^{4}\ kg/m^3}$$

$$= 1.48 \times 10^{-2}\ m^3/kmol$$

إذن :

$$\frac{\text{الحجم}}{\text{ذرة}} = \frac{1.48\times10^{-2}\ \text{kg/kmol}}{6.022\times10^{26}\ \text{atoms/kmol}}$$

$$= 2.45 \times 10^{-29}\ \text{m}^3/\text{atom}$$

ولكى نتخيل مدى صغر هذا الحجم سوف نستخدم الصيغة الرياضية لحجم الكرة فى حساب نصف قطر كل ذرة . هذه الصيغة على الصورة : $V = \frac{4}{3}\pi r^3$. إذن :

$$r = \left(\frac{3\times2.45\times10^{-29}}{4\pi}\right)^{1/3} = 1.8\times10^{-10}\ \text{m}$$

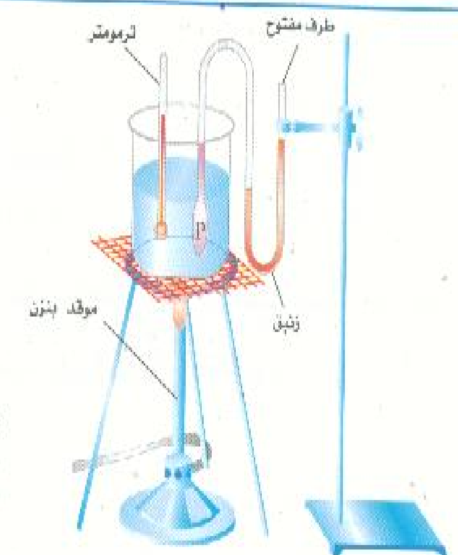
وبالطبع فإن قطر الذرة ضعف هذه الكمية ، أى 3.6×10^{-10} . وهكذا فإن قطر إحدى أثقل الذرات يساوى حوالى $0.36\ nm$ فقط . أى أنه إذا تراصت مليون ذرة من الزئبق جنبًا إلى جنب فى خط مستقيم فإنها ستشغل حيزًا طوله 0.36 mm فقط !

10-3 قانون الغاز المثالى

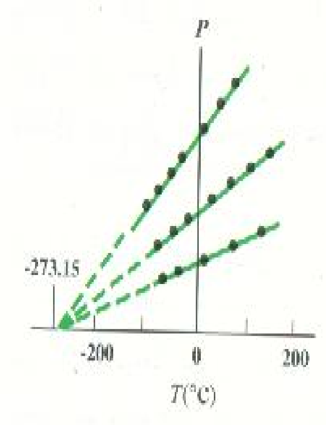
لفهم طبيعة درجة الحرارة كخاصية فيزيائية اهتم بعض الباحثين الأوائل بدراسة كيفية تغير ضغط الغاز مع درجة الحرارة . وقد أجريت التجارب الحاسمة فى هذا المجال من قرون عديدة ، وما زال الطلاب يقومون بإجراء هذه التجارب الأساسية فى مختبراتهم حتى اليوم . ويمثل ؛ الشكل 2–10 تجهيزة معملية بسيطة لمثل هذا الغرض . وهنا يقاس ضغط الغاز كدالة فى درجة الحرارة عند ثبوت حجم الغاز . وعند تمثيل نتائج مثل هذه التجربة بيانيًا سوف نحصل على منحنيات كالمبينة بالشكل 3–10 .



يزداد حجم الفقاعات الغازية كلما ارتفعت إلى أعلى تجاه سطح السائل . لماذا ؟



شكل 10-2 :
جهاز بسيط لقياس تأثير درجة الحرارة على ضغط الغاز عند ثبوت حجمه .



شكل 10-3 :
يقل ضغط الغاز غير الكثيف بانخفاض درجة الحرارة عند ثبوت الحجم (قانون جاى – لوساك) . المنحنيات الثلاثة تنتمي إلى نفس الغاز ، ولكن كمية الغاز في الحجم الثابت مختلفة .

واضح من الشكل أن هناك علاقة خطية بين الضغط المطلق (مدلول ضغط المقياس زائد P_a) ودرجة الحرارة ؛ مع ملاحظة أن الخطوط المستقيمة المختلفة تناظر شروطًا ابتدائية مختلفة للغاز داخل الوعاء . ومع ذلك يلاحظ في جميع الحالات وجود علاقة خطية بين درجة الحرارة والضغط عند ثبوت الحجم ، **بشرط أن يكون الغاز بعيدًا عن شروط التكثف أو الإسالة** .

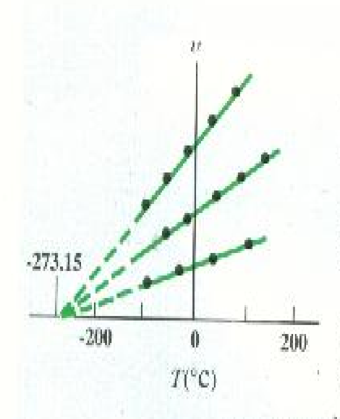
التجربة الهامة الأخرى هي قياس حجم غاز كدالة في درجة حرارته مع حفظ ضغطه ثابتًا . ويمثل الشكل 10-4 الرسم البياني النمطي للحجم مقابل درجة الحرارة . وهنا أيضًا توجد علاقة خطية : يزداد الحجم خطيًا مع درجة الحرارة عند ثبوت الضغط . ومرة ثانية ، هذا صحيح طالما كان الغاز بعيدًا عن شروط إسالته .

هناك كذلك سمة هامة أخرى يوضحها الشكلان 10-3 و 10-4 : **تتلاقى امتدادات جميع الخطوط المستقيمة عند نفس درجة الحرارة وهي $-273.15°C$** .

يمكن تمثيل العلاقتين التجريبيتين السابقتين رياضيًا كما يأتي :

$$P = (\text{constant})(T_c + 273.15\ C°) \quad (\text{عند ثبوت } V)$$

$$V = (\text{constant})(T_c + 273.15\ C°) \quad (\text{عند ثبوت } P)$$



شكل 10-4 :
يتغير حجم الغاز غير الكثيف خطيًا مع درجة الحرارة عند ثبوت P (قانون شارل) . المنحنيات الثلاثة تنتمي إلى نفس الغاز ، ولكن عند ضغوط مختلفة .

ويجب أن نؤكد هنا أن السلوك الذي تمثله المعادلتان السابقتان ينطبق على أي غاز مثالي . ويلاحظ من هاتين المعادلتين أن P أو V يصل إلى الصفر عندما $T_c = -273.15°C$. وتعرف درجة الحرارة الفريدة التي يحدث عندها ذلك **بالصفر المطلق** ، وهي تمثل أساس مقياس كلفن لدرجة الحرارة السابق ذكره في الجزء 10-1 . ولكن الحصول على نتائج عملية بالقرب من الصفر المطلق أمر مستحيل بالنسبة لمعظم الغازات وذلك لأنها تتكثف وتتحول إلى الحالة السائلة عند درجات حرارة أعلى من هذه بكثير . ومع ذلك فإن وجود درجة الحرارة الفريدة هذه يرجع أن لها أهمية أساسية من نوع ما ، وهذا ما سوف نناقشه بتفصيل أكثر فيما بعد .

وأخيرًا تبين سلسلة أخرى من التجارب أنه عند ثبوت T وتغيير P أو V فإن حاصل الضرب PV يظل ثابتًا طبقًا للمعادلة الآتية :

$$PV = (\text{constant})\ (\text{كمية الغاز})\ (T_c + 273.15\ C°)$$

ويمكنك أن تتحقق بنفسك أن هذه المعادلة تتفق مع المعادلتين الأخريين .

تقاس كمية الغاز في العينة عادة بعدد المولات n الذي يعطى بالعلاقة :

$$n = \frac{m}{M}$$

حيث m كتلة عينة الغاز ، M الكتلة الذرية أو الجزيئية للغاز . أما الثابت في معادلة PV السابقة فهو أحد الثوابت الفيزيائية العامة الذى يجب أن تعين قيمته عمليًا . هذا الثابت يسمى **ثابت الغازات** ويرمز له دائمًا بالرمز R . وباستعمال جميع الرموز السابقة في معادلة PV نحصل على :

$$PV = nRT \qquad (10-1)$$

حيث T هي درجة الحرارة المطلقة : $T = T_c + 273.15\ C°$.

العلاقة السابقة تسمى **قانون الغاز المثالي** ، وتسمى **الغازات التي تتبع هذا القانون بالغازات المثالية** . وقد وجد أن جميع الغازات تسلك هذا السلوك المثالي طالما كانت بعيدة عن الظروف التي يحدث عندها تكثف الغاز وتحوله إلى الحالة السائلة . هذا وقد أثبتت القياسات العملية المتكررة أن قيمة R بالوحدات SI هي :

$$R = 8314\ \text{J/kmol.K} = 8.314\ \text{J/mol.K}$$

وعليك أن تتأكد بنفسك أن وحدات R متسقة مع وحدات الكميات الأخرى في المعادلة (10-1) .

10-4 استخدام قانون الغاز المثالي

بعد أن تعرفنا على معنى الكميات المختلفة في قانون الغاز المثالي يمكننا الآن تطبيقه في حل مختلف المسائل . ويجب عند استعمال هذا القانون مراعاة الانتباه الشديد فيما يتعلق بوحدات الكميات المختلفة . **فدرجة الحرارة T يجب أن تكون مقاسة بالدرجات المطلقة** . وفي نظام الوحدات SI يقاس الضغط P بالباسكال (أي N/m^2) ويقاس الحجم بالأمتار المكعبة (m^3) . وفي هذه الحالة تكون قيمة R هي إحدى القيم المعطاة في القسم 3-10 ، وهذا يتوقف على ما إذا كان n بالمولات (mol) أو الكيلو مولات (kmol) .

مثال 2-10 :

الضغط الجوي القياسي ودرجة الحرارة القياسية هما 1.01325×10^5 Pa و $0.000\ C°$. (معدل الضغط ودرجة الحرارة يعني نفس هذا المعنى) . أوجد الحجم الذي يشغله 1.000 kilomole من غاز مثالي عند هاتين القيمتين للضغط P ودرجة الحرارة T .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يتعين به الحجم ؟

الإجابة : قانون الغاز المثالى يربط بين كميات أربع هى n ، T ، V ، P . فإذا علم ثلاث من هذه الكميات يمكن حل معادلة الغاز المثالى بالنسبة للكمية الباقية .

سؤال : كيف تترجم المعطيات إلى الرموز المستخدمة فى قانون الغاز المثالى ؟

الإجابة : تقول المعطيات أن $T_c = 0.000\ C^o$ ، ولذلك يجب تحويلها إلى درجة حرارة كلفنية ، $T = 273.15 + T_c = 273.15\ K$. كذلك فإن $P = 1.000\ atm = 1.013 \times 10^5\ Pa$ و $n = 1.000\ kmol$.

الحل والمناقشة : يمكن حل قانون الغاز المثالى جبريًا بالنسبة إلى V :

$$V = \frac{nRT}{P}$$

ومن المعطيات نجد أن V (لأربعة أرقام معنوية) يساوى :

$$V = (1.000\ kmol)(8314\ J/kmol.K)(273.15\ K)/(1.013 \times 10^5\ Pa)$$

$$= 22.42\ m^3/kmol$$

تحفظ هذه الكمية عن ظهر قلب .

الكيلو مول الواحد من أى غاز مثالى يشغل حجمًا قدره $22.4\ m^3$ عند معدل الضغط ودرجة الحرارة .

مثال 10-3 :

إذا حبس $14.0\ mg$ من غاز النيتروجين ($M = 28.0\ kg/kmol$) فى وعاء حجمه $5.00 \times 10^3\ cm^3$ عند $27.0°C$ ، فما ضغط الغاز فى الوعاء ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل لدينا المعطيات الكافية لحل قانون الغاز المثالى بالنسبة إلى P ؟

الإجابة : لدينا قيمة M ، m ، V ، T_c . وحيث أن $n = m/M$ ، إذن لدينا ثلاث كميات معلومة من الكميات الأربع .

سؤال : هل الوحدات معطاة كلها فى النظام SI ؟

الإجابة : لا . يجب تحويل T_c إلى T وتحويل V إلى أمتار مكعبة وتحويل m إلى كيلو جرامات .

الحل والمناقشة : لحل قانون الغاز المثالى بالنسبة إلى P يجب كتابته على الصورة :

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{m}{M}\frac{RT}{V}$$

قيم الكميات المعلومة بالوحدات SI تكون :

$$T = 27.0 + 273 = 300\ \mathrm{K} \qquad m = 14.0 \times 14^{-6}\ \mathrm{kg} \qquad V = 5.00 \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3}$$

إذن :

$$P = \frac{(14.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{kg})(8314\ \mathrm{J/kmol.K})(300\ \mathrm{K})}{(28.0\ \mathrm{kgkmol})(5.00\ \times 10^{-3}\ \mathrm{m^3})}$$

$$= 249\ \mathrm{N/m^2} = 249\ \mathrm{Pa}$$

مثال 4-10 :

استخدم قانون الغاز المثالي لتعيين كتلة الهواء الموجود في دورق حجمه $50.0\ \mathrm{cm^3}$ عند ضغط قدره 700 torr ودرجة حرارة قدرها 20°C . يتكون الهواء من النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 بنسبة كتلية تقريبية قدرها 80 % و 20 % على الترتيب .

استدلال منطقي :

سؤال : هل يمكن إيجاد قيمة m بمعلومية T_c ، V ، P ؟

الإجابة : ما لدينا من المعطيات يكفي للحصول على قيمة n ، ولكن لإيجاد m يجب أن نعلم أيضًا الكتلة الجزيئية M .

سؤال : الهواء خليط من غازين حسب نص المسألة ، كيف إذن يمكن إيجاد M ؟

الإجابة : نعلم من القسم 2-10 أن : $M\,(N_2) = 28\ \mathrm{kg/kmol}$

و $M\,(O_2) = 32\ \mathrm{kg/kmol}$ ، كما نعلم أيضًا النسبة المئوية لكل من الغازين في الخليط . إذن :

$$M\,(\mathrm{air}) = (0.80)(28\ \mathrm{kg/kmol}) + (0.20)(32\ \mathrm{kg/kmol})$$

$$= 29\ \mathrm{kg/koml}$$

سؤال : ما قيمة الكميات الأخرى بالوحدات SI ؟

الإجابة :

$$T = 273 + 20 = 293\ \mathrm{K}$$

$$P = (1.103 \times 10^5\ \mathrm{Pa/atm})(700\ \mathrm{torr})(760\ \mathrm{torr/atm})$$

$$= 9.33 \times 10^4\ \mathrm{Pa}$$

$$V = 50.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3}$$

الحل والمناقشة : يمكن كتابة قانون الغاز المثالي بدلالة m على الصورة $PV = (m/M)RT$. وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى m :

$$m = \frac{PVM}{RT}$$

$$= (9.33 \times 10^4\ \mathrm{Pa})(50.0 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^3})\frac{(29\ \mathrm{kg/kmol})}{(8314\ \mathrm{J/kmol\ K})(293\ \mathrm{K})}$$

$$= 5.5 \times 10^{-5}\ \mathrm{kg}$$

مثال 5-10 :

أغلق برميل زيت فارغ (إلا من الهواء) عند درجة حرارة قدرها 20°C ثم ترك بعد ذلك في الشمس فارتفعت درجة حرارته إلى 60°C . فإذا كان الضغط الابتدائي 1.0 atm ، فما هو الضغط النهائي في البرميل ؟ افترض أن حجم البرميل يظل ثابتًا عند تغير درجة الحرارة .

استدلال منطقي :

سؤال : نحن لا نعلم قيمة كل من n و V . هل توجد طريقة لاستخدام قانون الغاز المثالي بدون حله صراحة بالنسبة إلى هاتين الكميتين ؟

الإجابة : نعم ، فنحن نعلم أن n و V ثابتان لأن حجم البرميل لا يتغير مع درجة الحرارة ، كما أن n ثابت لأن البرميل محكم الغلق لا يتسرب منه الهواء . هذا الشرط يمكننا من استخدام قانون الغاز المثالي في صورة نسبة بين الكميات قبل وبعد التسخين . عندئذ يمكن اختصار كل من R ، V ، n في بسط ومقام النسبة .

سؤال : كيف تكون هذه النسبة ؟

الإجابة : يكتب قانون الغاز المثالي مرتين ، مرة بالنسبة للحالة الابتدائية والأخرى بالنسبة للحالة النهائية .

$$P_1V = nRT_1 \quad \text{و} \quad P_2V = nRT_2$$

وبقسمة المعادلة الأولى على الثانية نحصل على النتيجة البسيطة الآتية :

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

سؤال : هل يجب أن تكون كل هذه الكميات مقاسة بالوحدات SI ؟

الإجابة : يجب دائمًا أن تكون درجات الحرارة T مقاسة على مقياس كلفن . هذا لأن T ترتبط بكل من T_c و T_F بعلاقة **جمع عددي** ، ولذلك لا تختصر في النسبة . أما جميع الكميات الأخرى (n ، V ، T) فيمكن التعبير عنها في النسبة بأي وحدات نريد لأن معاملات التحويل بالضرب سوف تختصر في النسبة . ولكن يجب التأكد من أن هذه الكميات مقدرة بنفس الوحدات في الحالتين الابتدائية والنهائية .

الحل والمناقشة : من معطيات المسألة نجد أن $T_1 = 20 + 273 = 293\ \text{K}$ و $T_2 = 60 + 273 = 333\ \text{K}$. ونعلم أيضًا أن $P_1 = 1.0\ \text{atm}$. إذن :

$$P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1} = \frac{(1.0\ \text{atm})(333\ \text{K})}{293\ \text{K}} = 1.1\ \text{atm}$$

لاحظ أن استخدام T_c يعطي نتيجة مختلفة وغير صحيحة في نفس الوقت .

مثال 6-10 :

يعطي مقياس الضغط قراءة قيمتها 190 kPa للضغط في إطار سيارتك في يوم درجة حرارته 10°C- وضغطه البارومتري 800 torr . ماذا تكون قراءة مقياس الضغط بعد

قيادتك للسيارة وارتفاع درجة حرارة الإطار (والهواء الموجود فيه) إلى 35°C ؟ افترض أن حجم الإطار لا يتغير .

استدلال منطقي :

1

سؤال : هناك تشابه كبير بين هذه المسألة والمثال السابق . هل يمكن استخدام مدلول ضغط المقياس مباشرة في قانون الغاز المثالي ؟

الإجابة : لا لنفس السبب الذى يمنع استعمال T_c مباشرة . ذلك أن الضغط في قانون الغاز المثالي هو الضغط الكلي ، وهو يختلف عن P_G بمقدار جمعي . كذلك يمكن استخدام أى وحدات في النسبة ، ولكن الضغطين يجب أن يكونا هما الضغطان الكليان وليس مدلولي ضغط المقياس .

سؤال : ما هو الضغط الكلي الابتدائي ؟

الإجابة :

$$P_1 = P_a + P_G$$
$$= (800/760)(1.01 \times 10^5 \text{ Pa}) + 1.90 \times 10^5 \text{ Pa}$$
$$= (1.06 + 1.90) \times 10^5 \text{ Pa} = 2.96 \times 10^5 \text{ Pa}$$

سؤال : ما هي المعادلة الممكن استخدامها لتعيين P_2 ؟

الإجابة : $\frac{P_2}{P_1} = \frac{T_2}{T_1}$ أو $P_2 = P_1 \frac{T_2}{T_1}$

حيث $T_1 = 273 + (-10) = 263 \text{ K}$ ، $T_2 = 35 + 273 = 308 \text{ K}$

الحل والمناقشة : باستخدام البيانات نحصل على :

$$P_2 = (2.96 \times 105 \text{ Pa})(308/263) = 3.47 \times 10^5 \text{ Pa}$$

تذكر أن هذا هو الضغط الكلي . ولإيجاد قراءة المقياس يجب طرح Pa :

$$(P_2)_G = 3.74 \times 10^5 \text{ Pa} - (1.06 \times 10^5 \text{ Pa})$$
$$= 241 \text{ kPa}$$

مثال 10-7 :

يقوم محرك الديزل بحرق خليط الوقود والهواء بالتسخين الانضغاطي وليس باستخدام شمعات الإشعال . ولتوضيح هذه الظاهرة لنعتبر محرك ديزل نسبته انضغاطه 1 : 18 . هذا يعني أنه عند تشغيل المحرك يقوم الكباس بتغيير حجم الأسطوانة من حجم ابتدائي قدره V_1 إلى حجم نهائي قدره $V_2 = \frac{1}{18}V_1$. لنفرض أن خليط الوقود الغازي والهواء يدخل الأسطوانة عند درجة حرارة قدرها 300 k وضغط قدره 740 torr عندما يكون حجم الأسطوانة V_1 . ما هي درجة حرارة الغاز بعد أن يغير الكباس حجم الأسطوانة إلى V_2 . ويرتفع الضغط فيها إلى 37,000 torr ؟

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن استخدام قانون الغاز المثالى فى صورة نسبة مرة أخرى ؟

الإجابة : نعم . فبالرغم من أن T ، V ، P تتغير جميعًا ، فإنها تتغير بحيث تظل الكمية PV/T ثابتة ($PV/T = nR$) .

سؤال : ما هى معادلة النسبة بين درجتى الحرارة ؟

الإجابة : العلاقة $P_1V_1/T_1 = P_2V_2/T_2$ تعطينا :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

الحل والمناقشة : من المعادلة السابقة نجد أن :

$$T_2 = T_1\frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

$$= 300\text{ K}\left(\frac{37{,}000\text{ torr}}{740\text{ torr}}\right)\left(\frac{1}{18}\right) = 833\text{ K}$$

ودرجة الحرارة هذه كافية لإشعال الوقود .

10-5 الأساس الجزيئى لقانون الغاز المثالى

قانون الغاز المثالى $PV = nRT$ يعبر عن ضغط الغاز المثالى بدلالة درجة حرارته . لنناقش الآن ببعض التفصيل ماذا نعنى بالغاز المثالى . نحن نعلم أن الغاز يتكون من ذرات أو جزيئات مادة (أو خليط من المواد) ، وأن هذه الجزيئات تتحرك بحرية لتملأ أى حجم يحتويها . وبشىء من الدقة يمكن تعريف الغاز المثالى بأنه ذلك الغاز الذى يحقق الشروط الآتية :

1 ـ يمكن معاملة ذرات أو جزيئات الغاز على أنها كتل **نقطية** ، بمعنى أن حجمها مهمل بالنسبة إلى حجم الإناء V الذى يحتوى على الغاز .

2 ـ لا توجد أى قوى محسوسة بين الذرات أو الجزيئات ، باستثناء اللحظات التى تتصادم فيها مع بعضها البعض أو لحظات التصادم مع جدران الإناء . وسوف يفترض أن كل هذه التصادمات **تامة المرونة** .

سوف نقوم الآن باشتقاق علاقة بين درجة حرارة الغاز والخواص الميكانيكية لجزيئاته . وللحصول على هذه العلاقة سوف نستخدم هنا نموذجًا مبسطًا يعرف باسم **نظرية الحركة للغازات** .

وكبداية لهذا الموضوع علينا الرجوع إلى المثال 6–7 . لقد استخدمنا فى ذلك المثال مبدأى بقاء الطاقة وكمية التحرك لإثبات أن حزمة الجسيمات تمارس ضغطًا على الجدار الذى تتصادم معه . كذلك فإننا افترضنا أن جميع الجسيمات متساوية الكتلة m

والسرعة v ، وافترضنا بالإضافة إلى ذلك أن التصادمات جميعها تامة المرونة . وعندئذ وجدنا أن الضغط على الجدار يمكن كتابته على الصورة :

$$P = 4(\mathrm{KE})n_v$$

حيث KE هي طاقة حركة الجسيمات (وهي جميعًا متساوية الطاقة) و $n_v = N/V$ هو عدد الجزيئات لوحدة الحجم في الحزمة . (استبدلنا الرمز n الذى استخدمناه بدون دليل سفلي في الفصل السادس بالرمز n_v لتمييزه عن عدد المولات) .

ولكي تمثل هذه النتيجة الضغط الذى تؤثر به جزيئات عند درجة حرارة T على جدار الإناء، بدلاً من الضغط الناشيء عن حزمة موجهة من الجسيمات فإننا نحتاج إلى إجراء بعض التغييرات البسيطة . وتتضمن هذه التغييرات الاعتبارات الآتية :

1 ـ جزيئات الغاز لا تتحرك جميعها بنفس مقدار السرعة ، وفي هذا تختلف جزيئات الغاز عن جسيمات الحزمة . ومع ذلك يمكن وصف الغاز وصفًا ملائمًا بدلالة **متوسط** سرعة الجزيئات . ومن ثم فسوف يعبر عن ضغط الغاز بدلالة **متوسط** KE لجزيئاته .

2 ـ في حالة الغاز تتحرك الجسيمات في جميع الاتجاهات في ثلاثة أبعاد . وحيث أن جميع الاتجاهات في الفراغ متكافئة وليس هناك اتجاه مفضل على آخر ، فإن متوسط سرعة الجزيئات في الاتجاهات الثلاثة z ، y ، x لابد أن يكون متساويًا . هذا يعنى أن إسهام كل من مركبات الحركة الثلاث في متوسط طاقة الحركة (KE) سيكون متساويًا :

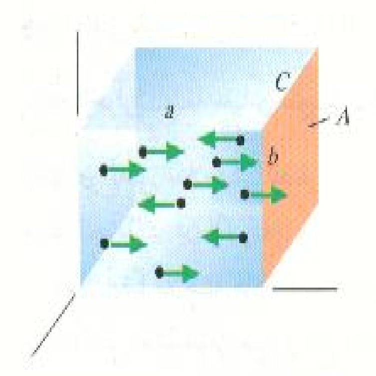
$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_z^2}$$

و :

$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} + \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} + \overline{\frac{1}{2}mv_z^2} = \overline{\frac{1}{2}mv^2} = \overline{\mathrm{KE}}$$

ومن هاتين العلاقتين يمكن كتابة :

$$\overline{\frac{1}{2}mv_x^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_y^2} = \overline{\frac{1}{2}mv_z^2} = \frac{1}{3}\overline{\mathrm{KE}}$$



شكل 5–10 :
لن يصطدم بالمساحة A إلا نصف عدد الجزيئات فقط (وهي الجزيئات المتحركة في الاتجاه الموجب للمحور x) .

3 ـ ولنفس السبب المذكور في البند 2 عاليه لابد أن يتساوى متوسط عدد الجسيمات المتحركة في الاتجاه الموجب لكل من المحاور z ، y ، x مع متوسط عددها الذى يتحرك في الاتجاهات السالبة . لنعتبر الآن جدار الإناء العمودى على الجزء الموجب من المحور x (شكل 5–10) . في هذه الحالة لن يتصادم مع هذا الجدار سوى تلك الجزيئات المتحركة في الاتجاه الموجب للمحور x فقط ، ومن ثم فإن الضغط سوف ينشأ نتيجة لتصادم هذه الجزيئات مع الجدار . بناء على ذلك يمكننا إثبات أن متوسط طاقة حركة هذه الجزيئات يساوى $\frac{1}{6}\left(\overline{\frac{1}{2}mv_x^2}\right)$ أو $\frac{1}{6}\overline{\mathrm{KE}}$.

وعليه فإن التعديلات اللازم إجراؤها في نتيجة المثال 6-7 تتلخص في إحلال متوسط طاقة حركة جزيئات الغاز $\frac{1}{6}\overline{\text{KE}}$ محل طاقة حركة حزمة الجزيئات KE . وهكذا ، فبدلاً من العلاقة $P = 4(\text{KE})n_v$ في حالة الحزمة الجسيمية سنجد في حالة الغاز المثالي أن :

$$P = 4\left(\frac{1}{6}\right)\overline{(\text{KE})}\,n_v = \frac{2}{3}\overline{(\text{KE})}\,n_v \qquad (10\text{-}2)$$

الآن أصبحنا في وضع يمكننا من تفسير درجة الحرارة بدلالة متوسط طاقة حركة جزيئات الغاز . فبمساواة الضغط المعطى بالمعادلة (2-10) بضغط الغاز المعطى بقانون القانون الغاز المثالي نحصل على :

$$\frac{2}{3}\overline{(\text{KE})}\,n_v = \frac{nRT}{V}$$

سنقوم الآن بالتوفيق بين بعض هذه الرموز . حيث أن عدد المولات n يرتبط بالعدد الكلي للجزيئات N طبقاً للعلاقة $n = N/N_A$ ، $n/V = (N/V)/N_A = n_v/N_A$ ؛ وباستعمال هذه التعويضات وإجراء بعض العمليات الجبرية البسيطة يمكننا كتابة :

$$\overline{\text{KE}} = \frac{3}{2}\frac{R}{N_A}T = \frac{3}{2}kT \qquad (10\text{-}3)$$

حيث $k = R/N_A$ يسمى **ثابت بولتزمان** وقيمته العددية كما يأتي :

$$k = 1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/k}$$

المعادلة (3-10) تمثل إحدى أهم نتائج نظرية الحركة للغازات ، فهي تعني أن درجة حرارة الغاز مقياس لمتوسط طاقة حركة جزيئات الغاز .

درجة الحرارة المطلقة مقياس لمتوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزيئات في الغاز المثالي .

لاحظ أن المعنى الكلاسيكي للصفر المطلق (OK) هو أنه درجة الحرارة التي تتوقف عندها الجزيئات عن الحركة .

هناك أيضاً ملاحظة هامة ثانية تتعلق بمعنى الاتزان الحراري . ولعلنا نذكر أن المواد الموجودة في حالة اتزان حراري مع بعضها البعض تكون متساوية في درجة الحرارة .

إذا وجد غازان مثاليان في حالة اتزان حراري أحدهما مع الآخر فإن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل جزئ يكون واحداً في كلا الغازين .

وهذا صحيح سواء كان تركيب الغاز متجانساً أم لم يكن .

لنتقدم الآن خطوة أخرى إلى الأمام ونقوم بحساب متوسط v^2 للجزيئات بفرض أن جميع الجزيئات لها نفس الكتلة m يمكننا كتابة :

$$\overline{\text{KE}} = \overline{\frac{1}{2}mv^2} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT \qquad (10\text{-}4)$$

ومنه نجد أن :

$$\overline{v^2} = 3kT / m$$

وإذا أخذنا الجذر التربيعى لهذه الكمية فإننا نحصل على نوع من السرعة المتوسطة يسمى جذر متوسط مربع السرعة v_{rms} :

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} \qquad (10\text{-}5)$$

السرعة rms **ليست** هى السرعة المتوسطة العادية ، **بل إنها سرعة جزئ طاقة حركته تساوى متوسط طاقة حركة الجزيئات** . ومن الأهمية بمكان أن نفهم أن هذه القيمة للسرعة تمثل متوسط سرعة الجزيئات بين التصادمات ، فالتصادمات تؤدى دائمًا إلى اعتراض حركة الجزيئات وتغيير اتجاهاتها .

وبالرغم من أن هذه النصوص والعبارات تنطبق على الغاز المثالى فقط ، فإننا سنرى فى فصول لاحقة أن درجة الحرارة المطلقة مقياس لطاقة الحركة لكل جزئ حتى فى حالة السوائل والغازات . ومع ذلك فهى ليست مقياسًا بسيطًا .

وقبل أن نترك هذا القسم نود أن نوضح أن هذه النتائج تنطبق على الغازات الحقيقية عند درجات الحرارة العالية والمتوسطة فقط . ذلك أنه يلاحظ حدوث أشياء فى منتهى الغرابة بالقرب من الصفر المطلق ؛ فبعض الفلزات تتحول إلى موصلات كهربائية عديمة المقاومة ، كما يتحول انسياب بعض الموائع إلى انسياب لا احتكاكى تمامًا (أى أن لزوجتها تصبح صفرًا) . هذا السلوك الشاهد للجزيئات عند درجات الحرارة المنخفضة يجب معالجته باستخدام ميكانيكا الكم ، وهو الموضوع الذى سنناقشه فى الفصول القليلة الأخيرة من هذا الكتاب وكذلك فى بعض « وجهات النظرية الحديثة » التى نجدها تباعًا خلال الكتاب .

مثال توضيحى 2-10

ما قيمة جذر متوسط مربع سرعة جزئ النيتروجين عند 27.0°C ؟

استدلال منطقى : لاستخدام المعادلة (5-10) يجب معرفة كتلة الجزئ ودرجة الحرارة . ونحن نعلم أن الكتلة لكل جزئ هى الكتلة الجزيئية للغاز M مقسومة على عدد الجزيئات لكل مول N_A . وحيث أن الكتلة الجزيئية للنيتروجين N_2 تساوى 28.0 kg/kmol ، إذن :

$$m = \frac{M}{N_A} = \frac{28.0\ \text{kg/kmol}}{6.02 \times 10^{26}\ /\text{kmol}} = 4.65 \times 10^{-26}\ \text{kg}$$

وباستعمال المعادلة (5-10) نجد أن :

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3(1.38 \times 10^{-23}\ \text{J/K})(300\ \text{K})}{4.65 \times 10^{-26}\ \text{Kg}}} = 517\ \text{m/s}$$

لاحظ أن هذه سرعة عالية جدًا فهى تساوى ثلث الميل لكل ثانية ! وبناء على ذلك ،

هل يمكنك تفسير لماذا تستغرق رائحة غاز ما ، جزيئات العطر مثلاً ـ زمناً طويلاً لانتقالها خلال الغرفة ؟

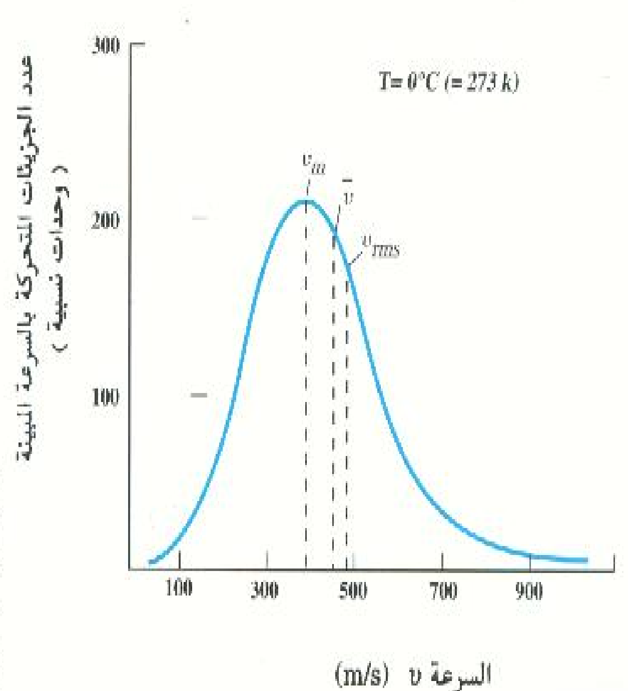
10-6 توزيع السرعات الجزيئية

فى القسم السابق افترضنا ضمنيًا أن جزيئات الغاز لا تتحرك جميعها بنفس السرعة ، ولكننا لم نحدد توزيع هذه السرعات ، بمعنى أننا لم نذكر النسبة العددية للجزيئات التى تتحرك بسرعة معينة أو فى مدى معين للسرعة . وقد استخدم الفيزيائى الاسكتلندى جيمس كليرك ماكسويل نظرية الحركة للغازات فى عام 1860 لاشتقاق تعبير نظرى لوصف العدد النسبى من جزيئات الغاز الذى يتحرك بسرعة معينة عند درجة حرارة معينة T . هذه العلاقة تسمى **توزيع ماكسويل** ، وهى موضحة بيانيًا بالشكل 6-10 لجزيئات غاز O_2 عند درجة $273\ K$. لاحظ أن هناك سرعتين أخريين ، بالإضافة إلى v_{rms} ، مبينتين على المنحنى ، وهاتان السرعتان مهمتان من الناحية الإحصائية . السرعة الأولى وهى v_m تسمى **السرعة الأكثر احتمالاً** ، وهى تمثل السرعة التى يتحرك بها أكبر عدد من الجزيئات . أما السرعة الثانية $\bar{v}$ فهى **السرعة المتوسطة للجزيئات** . وتعطى هذه السرعات الثلاث بالمعادلات الآتية :

$$v_m = \sqrt{2}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.414\sqrt{\frac{kT}{m}}$$

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8}{\pi}}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.596\sqrt{\frac{kT}{m}}$$

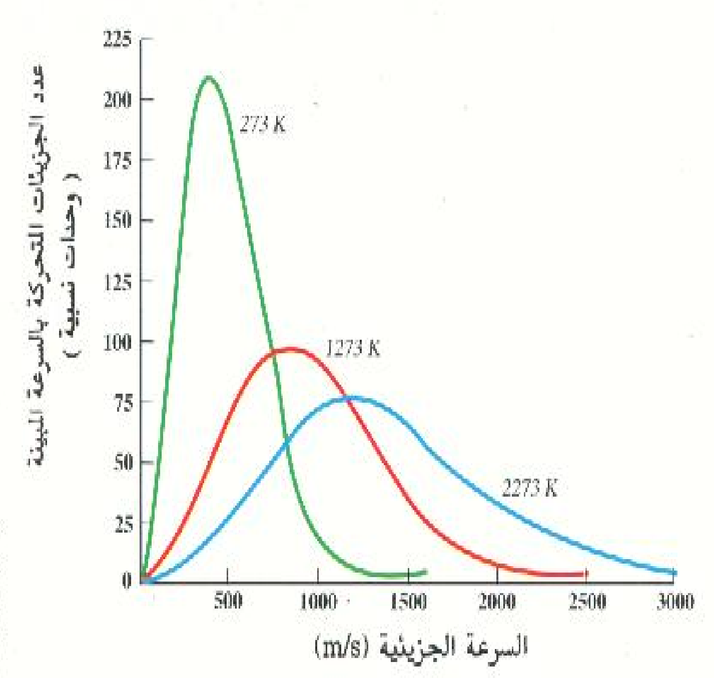
$$v_{rms} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{kT}{m}} = 1.732\sqrt{\frac{kT}{m}}$$



شكل 6-10 : التوزيع الماكسويلى للسرعات فى عينة من غاز O_2 عند $273\ K$. قيم السرعة الأكثر احتمالاً v_m والسرعة المتوسط $\bar{v}$ وجذر متوسط مربع السرعة v_{rms} موضحة على المنحنى .



توضح هذه الصورة للعدائين فـــي سـباق المارثون توزيعًا متميزًا للسرعات .



شكل 7–10 :
توزيع الســرعات الجزيئيــة لغــاز N_2 . تتحرك قمة منحنى التوزيع تجاه السرعات الأعلى ويزداد اتساع المنحنى بزيادة درجة حرارة الغاز .

وعليه فإذا علمت قيمة إحدى هذه السرعات يمكن إيجاد السرعتين الأخريين بسهولة .

يوضح الشكل 7–10 كيف يتغير توزيع السرعات في عينة من غاز N_2 بتغير درجة الحرارة . ويبين هذا الشكل أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدى إلى تفلطح منحنى توزيع السرعات وإزاحة قمته v_m في اتجاه القيم لأعلى . ويلاحظ أيضًا من شكل توزيع ماكسويل للسرعات أن هناك دائمًا عددًا قليلاً من الجزيئات التي تتحرك ببطئ شديد ، كما أن هناك دائمًا عددًا قليلاً منها يتحرك بسرعات أكبر كثيرًا من v_{rms} .

وتجدر الإشارة هنا إلى أن نظرية ماكسويل كانت موضع الكثير من الجدل حين إعلانها. ذلك أن الاختبار العملي لهذه النظرية كان يستلزم استعمال غرفة مفرغة منخفضة الضغط جدًا حتى يمكن قياس السرعات الجزيئية بدون التصادمات التي تغير اتجاهات السرعة باستمرار ، وهذا ما لم يتوفر في ذلك الحين . ولكن بحلول 1926 استطاع الفيزيائي

الألمانى أوتوشتيرن إجراء تجربته الشهيرة التى أكدت تنبؤات ماكسويل النظرية عن توزيع السرعات الجزيئية . والواقع أن نظرية ماكسويل والتأكيد العملى لها يمثل خطوة هامة للغاية على الطريق فى مجال فهم الخواص الحرارية للمادة ، وهو ما سنتناوله بالمناقشة فى الفصول القليلة التالية :

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الاتزان الحرارى ، (ب) الترمومتر ، (جـ) مقياس سلزيوس . (د) مقياس فهرنهيت ،(هـ) الصفر المطلق ، (و) مقياس كلفن ، (ز) القانون الصفرى للديناميكا الحرارية ، (ح) عدد أفوجادرو ، (ط) المول والكيلو مول ، (ى) الكتلة الذرية والكتلة الجزيئية ، (ك) ثابت الغازات R ، (ل) ثابت بولتزمان k ، (م) الغاز المثالى ، (ن) قانون الغاز المثالى ، (س) نظرية الحركة للغازات ، (ع) جذر متوسط مربع السرعة .

2 ـ التعبير عن العلاقة بين مقاييس درجة الحرارة الثلاثة المشهورة فى صورة رسم تخطيطى مع توضيح موضع الصفر المطلق ونقطتى تجمد وغليان الماء على كل من المقاييس الثلاثة . تحويل درجات الحرارة بين هذه المقاييس .

3 ـ حساب كتلة الذرة الواحدة أو الجزئ الواحد من مادة بمعلومية الكتلة الذرية أو الكتلة الجزيئية M لهذه المادة .

4 ـ حساب عدد المولات أو الكيلو مولات فى عينة معلومة الكتلة عندما تكون الكتلة الذرية أو الجزيئية للمادة معلومة .

5 ـ استخدام قانون الغاز المثالى لإيجاد أى من الكميات الثلاث T ، V ، P بمعلومية الكميتين الأخريين .

6 ـ ذكر الشروط التى يجب توفرها ليكون غاز ما غازًا مثاليًا .

7 ـ حساب متوسط طاقة الحركة الانتقالية لذرات أو جزيئات غاز مثالى بمعلومية درجة حرارة الغاز .

8 ـ حساب جذر متوسط مربع سرعة ذرات أو جزيئات كتلة معلومة من غاز مثالى إذا أعطيت درجة حرارة الغاز والكتلة الذرية أو الجزيئية للغاز .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

عدد أفوجادرو : المول (N_A)

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23} \text{ particles/mol}$$

ثابت الغازات (R) :

$$R = 8314 \text{ J/kmol.K}$$

ثابت بولتزمان (k) :

$$k = R/N_A = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

مقاييس درجة الحرارة :

النقط المرجعية الآتية خاصة بالماء النقى عند ضغط محيط قدره 1 atm :

	°C	°F	K
نقطة الغليان	100	212	373.15
نقطة التجمد	0	32	273.15

خلاصة :

1 ـ الكلفن (K) هو الوحدة الأساسية لدرجة الحرارة فى النظام SI .

2 ـ الدرجة السيليزية تساوى الكلفن فى الحجم .

3 ـ الدرجة الفهرنهيتية تساوى 5/9 قدر الدرجة السيليزية .

4 ـ OK هو الصفر المطلق .

5 ـ العلاقة بين T_C و T_F هى $T_C = (T_F - 32)(5/9)$.

المول وعدد أفوجادرو :

عدد أفوجادرو N_A هو عدد الذرات فى 12 g من النظير ^{12}C بالضبط . المول الواحد هو أى مجموعة مكونة من N_A كيانًا . الكتلة الجزيئية (أو الذرية) من مادة هى كتلة مول واحد من جزيئات (أو ذرات) المادة .

قانون الغاز المثالى :

$$PV = nRT = NkT$$

خلاصة :

1 ـ يجب التعبير عن درجة الحرارة دائمًا بالكلفن حتى عند استخدام نسب هذه المعادلة لمقارنة الظروف المختلفة .

2 ـ فى قانون الغاز المثالى يمثل n عدد المولات أو الكيلو مولات ، بينما يمثل N عدد الجزيئات أو الذرات .

3 ـ يمكن التعبير عن ثابت الغاز بوحدات مختلفة متعددة . يجب أن نتأكد دائمًا أن وحدات V و P متسقة مع وحدات R .

4 ـ الضغط P هو الضغط الكلى وليس مدلول المقياس .

نظرية الحركة للغازات :

متوسط طاقة الحركة الانتقالية لكل ذرة أو جزئ فى غاز مثالى يرتبط بدرجة الحرارة طبقًا للمعادلة :

$$\overline{KE} = \frac{1}{2}m\overline{v^2} = \frac{3}{2}kT$$

جذر متوسط مربع سرعة الذرات أو الجزيئات هو :

$$v_{rms} = \sqrt{\overline{v^2}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ قارن طاقة الجهد التثاقلى لجزئ نيتروجين يقع على ارتفاع قدره 1 m فوق سطح الأرض بطاقة حركته الانتقالية عندما تكون درجة الحرارة (أ) 0°C ، (ب) -270°C .

2 ـ بالرغم من أن الهواء يتكون أساسًا من جزيئات N_2 ، إلا أنه يحتوى على بعض O_2 بالطبع . هل يتحرك هذان النوعان من الجزيئات بنفس السرعة المتوسطة ؟ ما هى العلاقة بين هاتين السرعتين المتوسطتين بالضبط ؟

3 ـ لكى يهرب جسم من الأرض يجب أن يقذف هذا الجسم خارجها بسرعة لا يقل مقدارها عن 11,200 m/s . استخدم هذه الحقيقة وكذلك قيمة تقريبية للضغط الجوى فى تفسير وجود ذلك القدر الضئيل فقط من الهيدروجين فى الجو ، بالرغم من أن كميته فى الجو منذ بلايين السنين كانت أكبر من كمية النيتروجين فيه .

4 ـ ينص قانون بويل للغازات على أن حجم الغاز يتناسب عكسيًا مع ضغطه ، بشرط أن تكون كمية الغاز ودرجة حرارته ثابتتين . اثبت أن قانون بويل حالة خاصة من قانون الغاز المثالي .

5 ـ ينص قانون شارل على أن حجم الغاز يزداد طرديًا بزيادة درجة الحرارة ، بشرط أن يكون ضغط الغاز وكميته ثابتتين . أثبت أن هذا القانون حالة خاصة من قانون الغاز المثالي .

6 ـ ينص قانون دالتون للضغوط الجزيئية على أن الضغط الكلي لخليط من الغازات يساوى مجموع الضغوط الجزيئية للغازات في الخليط . اثبت صحة ذلك باستخدام قانون الغاز المثالي ونظرية الحركة .

7 ـ حبس خليط من غازى الهيدروجين والأكسجين عند الضغط الجوى في مخبار زجاجي قوى يحتوى على قطبين كهربائيين . أطلقت شرارة بين القطبين فسببت اشتعال الغازين وتفاعلهما طبقًا للمعادلة $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$. هل سيتغير الضغط في الأنبوبة بعد أن تعود درجة الحرارة إلى قيمتها الأصلية (200°C) ؟ اشرح . ماذا يحدث إذا كانت درجة الحرارة الأصلية 200°C ودرجة الحرارة الابتدائية 20°C ؟

8 ـ بينما كان يوليوس قيصر يلفظ أنفاسه إثر إصابته القاتلة ، صاح وهو يمسك بيد صديقه « حتى أنت يا بروتس » ؛ ومع هذه الجملة خرجت في هواء زفيره كمية من غاز النيتروجين . قدر عدد هذه الجزيئات التاريخية التي تستنشقها مع كل نفس من أنفاسك إذا علمت أن جو الأرض يحتوى على 10^{19} kg من الغاز .

9 ـ كم ستكون قراءة بارومتر زئبقي في سفينة فضائية تدور حول الأرض إذا كان ضغط الهواء في السفينة 75 cmHg .

مسائل

القسم 10-1

1 ـ حول ما يأتي إلى مقياسي درجة الحرارة الآخرين : (أ) 74°F ، (ب) -28°C ، (جـ) 280 k .

2 ـ حول ما يأتي إلى مقياسي درجة الحرارة الآخرين : (أ) 72°C ، (ب) -22°F ، (جـ) 230 k .

3 ـ نقطة غليان الهيدروجين السائل 252.87°C . عبر عن درجة الحرارة هذه بالدرجات الفهرنهيتية والكلفن .

4 ـ في يوم معين كان الفرق بين درجتى الحرارة العظمى والصغرى 62°F . احسب قيمة هذا الفرق بالدرجات السيليزية والكلفينية .

5 ـ مادة نقطة غليانها 486.60°C ونقطة انصهارها تقل بمقدار 528.4°F عن نقطة الغليان . (أ) ما هي نقطة الانصهار بالدرجات السيليزية ؟ (ب) عين نقطتى الغليان والانصهار بالدرجات الفهرنهيتية .

6 ـ إذا تغيرت درجة حرارة مادة بمقدار ΔT_C على مقياس سلزيوس ، إثبت أن التغير المناظر على مقياس فهرنهيت هو $\Delta T_F = \frac{9}{5}\Delta T_C$.

7 ـ يعتقد أن أعلى درجة حرارة تم تسجيلها على سطح الأرض على الإطلاق كانت في ليبيا عام 1922 ، وكانت تساوى 136°F . أما أدنى درجة حرارة وهى -128.56°F فقد سجلت عام 1983 في محطة فوستوك بالقارة المتجمدة الجنوبية . حول درجتى الحرارة هاتين إلى الدرجات السيليزية والكلفن .

8 ـ عند أى درجة حرارة تتساوى القيمة العددية على مقياس فهرنهيت وسلزيوس ؟

9 ـ ما مقدار درجة حرارة جسم التى تكون واحدة على مقياس فهرنهيت وكلفن ؟

10 ـ درجة حرارة جسم إنسان في حالة صحية جيدة هى 98.6°F . عبر عن درجة الحرارة هذه بالدرجات السيليزية والكلفن .

القسم 10-2

11 ـ ما هى كتلة الذرة الواحدة من (أ) الذهب ؟ (ب) الفضة ؟ (جـ) الحديد ؟

12 ـ الصيغة الكيميائية لغاز النشادر هى NH_3 . ما كتلة جزئ واحد من غاز النشادر ؟

13 ـ الصيغة الكيميائية للبنزين هى C_6H_6 . ما عدد جزيئات البنزين فى عينة كتلتها 50 g ؟

14 ـ ما عدد الذرات الموجودة فى قالب كتلته 20 g من النحاس النقى ؟

15 ـ يحتوى كأس على كتلة قدرها 80 g من الماء . ما عدد جزيئات الماء فى الكأس ؟ الصيغة الكيميائية للماء هى H_2O .

16 ـ الكتلة الجزيئية للنيلون هى 10,000 kg/kmol ، وكثافته تساوى 1100 kg/m³ ، (أ) أوجد كتلة جزئ النيلون . (ب) ما عدد جزيئات النيلون فى كتلة قدرها 1 kg ؟ (جـ) ما عدد الجزيئات فى حجم قدره 1 m³ من النيلون ؟

17 ـ كثافة الكحول الإيثيلى (C_2H_5OH) تساوى 790 kg/m³ تقريبًا . أوجد (أ) كتلة جزئ من الكحول الإيثيلى ، (ب) عدد الجزيئات فى 1 liter من الكحول الإيثيلى .

18 ـ اعتبر أن رجلاً كتلته 60 kg يمثل جزيئًا ضخمًا . ما هى كتلته الجزيئية ؟

القسمان 3–10 و 4–10

19 ـ خزان حجمه 1 liter يحتوى على غاز الأكسجين O_2 عند درجة 22°C . فإذا كان مدلول ضغط المقياس 2.2×10^6 Pa ، فما كتلة الأكسجين فى الخزان ؟

20 ـ يحتوى خزان حجمه 2 liter على غاز الهليوم He عند درجة حرارة قدرها 33°C وضغط قدره 1200 kPa . ما كتلة الهليوم الموجود بالخزان ؟

■ 21 ـ قدر الكتلة الكلية للهواء فى غرفة غير مدفئة حجمها 6 m × 8 m × 10 m فى يوم من أيام الشتاء درجة حرارته 20°F . اعتبر أن متوسط الكتلة الجزيئية للهواء 28.8 kg/kmol . ما هى كمية الهواء التى تدخل الغرفة أو تخرج منها إذا ارتفعت درجة الحرارة إلى 75°F . افترض أن الضغط فى الغرفة يساوى الضغط الجوى .

22 ـ ملأت أنبوبة اختبار بغاز مثالى عند درجة حرارة قدرها 27°C حينما كان مدلول ضغط المقياس فيها 180 kPa ثم أغلقت بإحكام . ماذا سيكون مدلول ضغط المقياس فى الأنبوبة عند تسخينها إلى 384°C .

■ 23 ـ ملأت قارورة حجمها نصف لتر بغاز مجهول فازدادت كتلتها بمقدار 568 mg عن كتلتها وهى مفرغة . فإذا كان ضغط الغاز 80 kPa ودرجة حرارته 23°C ، فما هى الكتلة الجزيئية للغاز ؟

24 ـ تحتوى أنبوبة اختبار مغلقة بإحكام على كمية من غاز النيتروجين N_2 عند درجة حرارة قدرها 27°C ومدلول ضغط المقياس فيها 240 kPa . ما قيمة مدلول ضغط المقياس للغاز عند تبريده إلى درجة حرارة قدرها -88°C ؟

25 ـ ما حجم كمية من الهواء ضغطها الابتدائى 100 kPa اللازمة لملأ إطار سيارة حجمه V_0 حتى يصل مدلول ضغط المقياس فيه إلى 160 kPa ؟

■ 26 ـ تحررت فقاعة هوائية من غواصة فى قاع بحيرة فتضاعف حجمها ثلاث مرات أثناء صعودها إلى سطح البحيرة . قدر عمق البحيرة بفرض أن درجة حرارة البحيرة والهواء لا تتغير أثناء صعود الفقاعة إلى السطح .

27 ـ خزان حجمه 1 liter يحتوى على غاز الأكسجين عند مدلول ضغط مقياس قدره 840 kPa . ما الحجم الذى يشغله الغاز عند تمدده حتى يصل ضغطه إلى الضغط الجوى 100 kPa ؟ افترض أن درجة حرارة الغاز ثابتة .

28 ـ ضغط غاز عند درجة حرارة الغرفة (27°C) والضغط الجوى 100 kPa حتى وصل حجمه إلى عشر قيمته الأصلية وزاد ضغطه المطلق إلى 2500 kPa . ما هى درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟

29 ـ ضغطت كمية معينة من غاز فى خزان عند درجة حرارة قدرها 27°C إلى أن تضاعف ضغطها ثلاث مرات وقل حجمها إلى النصف . أوجد نسبة درجة الحرارة الابتدائية للغاز إلى درجة حرارته النهائية .

- 30 ـ خزان يحتوى على 1 mol من غاز الأكسجين عند ضغط مطلق قدره 500 kPa ودرجة حرارة قدرها 27°C . (أ) إذا سخن الغاز عند ثبوت الحجم حتى أصبح ضغطه أربعة أضعاف الضغط الابتدائى ، فما هى درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟ (ب) إذا سخن الغاز بحيث تضاعف كل من حجمه وضغطه مرتين ، فما هى درجة الحرارة الجديدة للغاز ؟
- 31 ـ فى محرك الديزل يضغط الكباس الهواء عند درجة حرارة قدرها 30°C من ضغط مساو للضغط الجوى تقريبًا إلى ضغط قدره حوالى 5400 kPa وحجم يساوى 1/15 من حجمه الأصلى . ما هى درجة الحرارة النهائية للهواء المضغوط ؟
- 32 ـ يؤدى التمدد الفجائى للغازات إلى تبريدها . وفى عملية تبريد من هذا النوع تمدد غاز درجة حرارته 27°C من ضغط قدره 4000 kPa إلى الضغط الجوى فأصبح حجمه 36 ضعفًا قدر حجمه الابتدائى . ما هى درجة الحرارة النهائية للغاز المبرد ؟
- 33 ـ تمدد غاز عند درجة حرارة قدرها 27°C وضغط مطلق قدره 1000 kPa تمددًا فجائيًا فى غرفة حجمها 12 مرة قدر حجم الغاز . فإذا كانت درجة حرارته الجديدة −10°C ، فما هو الضغط النهائى للغاز ؟
- 34 ـ أخرجت سمكة على عمق 10 m فى الماء العذب هواء الزفير على هيئة فقاعة حجمها V_0 . أوجد حجم الفقاعة قبل أن تصل إلى السطح مباشرة . افترض أن درجة حرارة الفقاعة تظل ثابتة أثناء الصعود .
- 35 ـ قلبت أنبوبة اختبار أسطوانية طولها 16 cm ثم دفعت بطرفها المفتوح رأسيًا إلى أسفل فى الماء . ما مقدار ارتفاع الماء داخل الأنبوبة عندما يصبح طرفها المغلق عند سطح الماء ؟ افترض أن ضغط الهواء عند سطح الماء (وفى الأنبوبة قبل غمرها) يساوى 1 atm . افترض أيضًا أن درجة حرارة الهواء داخل الأنبوبة تظل ثابتة أثناء غمرها .
- 36 ـ يصمم بالون الأرصاد الجوية بحيث يتمدد إلى أقصى نصف قطر له وقدره 24 m (باعتباره كرة مجوفة) عندما يطير على ارتفاع يكون الضغط فيه 3 kPa فقط وتكون درجة الحرارة فيه −73°C . إذا كان البالون مملوءًا بالهليوم عند الضغط الجوى ودرجة حرارة قدرها 27°C ، ما حجم البالون لحظة إطلاقه ؟

37 ـ تحول 1 liter من الماء السائل إلى بخار عند الضغط الجوى ودرجة حرارة قدرها 100°C . ما حجم بخار الماء الناتج ؟

38 ـ استخدم قانون الغاز المثالى وتعريف المول بدلالة كتلة الغاز فى إيجاد كثافة غاز ؟

39 ـ عين كثافة غاز الأكسجين O_2 عند درجة الحرارة والضغط القياسيين باستعمال قانون الغاز المثالى .

القسمان 5-10 و 6-10

40 ـ تقدر درجة الحرارة فى باطن الشمس بحوالى 14×10^6 K ، ومن المعلوم أن البروتونات ($m = 1.67 \times 10^{-27}$ kg) تكون الجزء الأعظم من كتلة الشمس . بفرض أن البروتونات فى باطن الشمس تسلك سلوك غاز مثالى ، أوجد القيمة التقريبية لجذر متوسط مربع سرعة البروتون .

41 ـ ما هى درجة الحرارة التى تتساوى عندها السرعة rms لجزيئات النيتروجين بالسرعة rms للهليوم عند 27°C ؟

42 ـ عند أى درجة حرارة تصبح السرعة rms لجزيئات غاز مثالى ثمانية أضعاف السرعة rms لنفس الجزيئات عند 0°C ؟

43 ـ ما متوسط طاقة حركة جزيئات الأكسجين عند درجة الغرفة (27°C) ؟

44 ـ سرعة هروب القذوف فوق سطح من الأرض حوالى 11.2 km/s . (أ) عند أى درجة حرارة تتساوى السرعة rms لجزيئات الهيدروجين مع هذه السرعة ؟ (ب) كرر المسألة بالنسبة لجزيئات النيتروجين N_2 والأكسجين O_2 .

45 ـ سرعة الهروب من فوق سطح القمر حوالى 2.37 km/s . عند أى درجة حرارة تكون السرعة rms لجزيئات الهليوم مساوية لهذه السرعة ؟

46 ـ درجة الحرارة فى الفضاء الخارجى حوالى 3 K . وقد أثبتت الدراسات أن الفضاء الخارجى يتكون أساسًا من ذرات الأيدروجين المنفردة بمعدل ذرة واحدة لكل سنتيمتر مكعب من الحجم . (أ) أوجد ضغط غاز الأيدروجين الذرى فى

الفضاء الخارجي ؛ وعبر عن الإجابة بالضغط الجوى (atm) . (ب) أوجد متوسط طاقة الذرة الواحدة من الهيدروجين فى هذا الغاز . (جـ) ما سرعة الذرة الواحدة ؟

47 ـ إثبت أن ضغط الغاز المثالى يمكن كتابته على الصورة $P = \rho\overline{v^2} / 3$.

■ 48 ـ أوجد كثافة بخار الماء عند 1 atm و 100°C باعتباره غازًا مثاليًا . قارن نتيجة حساباتك بالكثافة الفعلية للبخار وهى $0.598\ kg/m^3$. برر أى فرق قد تلاحظه .

49 ـ إذا كانت السرعة rms لغاز عند درجة الحرارة 27°C تساوى 80 m/s ، فما كتلة الجزئ الواحد من هذا الغاز ؟ هل هذا مثال لجزئ من غاز واقعى ؟

■ 50 ـ تتحرك حزمة من الجسيمات كتلة كل منها m_0 وسرعته v على استقامة المحور x . وتضرب جسيمات هذه الحزمة مساحة قدرها $1\ mm^2$ بمعدل 1×10^{16} جسيمًا فى الثانية . أوجد ضغط الحزمة الجسيمية على هذه المساحة إذا كانت الجسيمات تلتصق بها عند التصادم . كرر الحل بالنسبة لحزمة إلكترونية فى أنبوبة التليفزيون حيث $m_0 = 9.1 \times 10^{-31}\ kg$ و $v = 8 \times 10^7\ m/s$.

■ 51 ـ إناء مكعب الشكل حجمه 2.5 liter ويحتوى على خليط من غازى الهليوم He والهيدروجين H_2 فى حالة اتزان عند درجة الحرارة 120°C . (أ) ما متوسط طاقة حركة كل نوع من الجزيئات ؟ (ب) ما قيمة السرعة rms لهذين الجزيئين ؟ (جـ) إذا كان الإناء يحتوى على 1 mol من الهليوم و 2 mol من الهيدروجين ، فما هو الضغط الكلى داخل الإناء ؟

مسائل إضافية

■ 52 ـ إناء مغلق مكعب الشكل طول ضلعه 24 cm يحتوى على ضعف عدد أفوجادرو من الجزيئات عند درجة حرارة قدرها 27°C . ما مقدار القوة التى يؤثر بها الغاز على أحد جدران الإناء ؟

■ 53 ـ وضعت أسطوانة دائرية قائمة ذات قاعدة واحدة ارتفاعها 36.00 cm ومساحة قاعدتها $10.0\ cm^2$ على منضدة عند الضغط ودرجة الحرارة القياسيين بحيث كان طرفها المفتوح إلى أعلى . بعدئذ وضع كباس سدود للغاز (يغلق الأسطوانة بإحكام دون احتكاك) كتلته 4.8 kg فى الأسطوانة وسمح له بالسقوط إلى ارتفاع يتحقق عنده اتزانه . ما قيمة الضغط داخل الأسطوانة وارتفاع الكباس فى حالة الاتزان ؟ افترض أن درجة الحرارة النهائية 0°C .

■ 54 ـ وضعت أنبوبة زجاجية ضيقة طولها 1 m ومغلقة فى أحد طرفيها فى وضع أفقى . بعدئذ وضعت قطرة كبيرة تكفى لغلق الأنبوبة فى المنتصف تمامًا عند درجة حرارة قدرها 27°C ثم غمر الطرف المغلق للأنبوبة فى ماء يغلى (درجة حرارته 100°C) . أين سيكون الوضع الجديد لقطرة الزئبق فى الأنبوبة ؟

■ 55 ـ أنبوبة شعرية رأسية يملأ جزءها السفلى عمود من الزئبق ارتفاعه 6 cm . أغلق الطرف العلوى للأنبوبة بإحكام (عند الضغط الجوى) عند نقطة ترتفع عن السطح العلوى للزئبق مسافة قدرها 20 cm . إذا قلبت الأنبوبة رأسًا على عقب ، فما طول عمود الهواء فى الجزء السفلى للأنبوبة ؟

■■ 56 ـ وضعت قطعة من الثلج الجاف (CO_2) فى أنبوبة اختبار ثم سدت فوهتها باللحام . إذا كانت كتلة الثلج الجاف 0.4 g وكان حجم الأنبوبة بعد لحامها $22\ cm^3$ ، فما هو الضغط الكلى لغاز CO_2 فى الأنبوبة بعد أن يتم تبخر الثلج الجاف ويصل الغاز إلى حالة اتزان حرارى مع الوسط المحيط عند درجة حرارة قدرها 27°C ؟

■ 57 ـ عندما سدت أنبوبة اختبار حجمها $24\ cm^3$ بإحكام عند درجة حرارة منخفضة جدًا تكثفت بضعة قطرات من النيتروجين السائل فى الأنبوبة من الهواء الذى كان فيها (نقطة غليان النيتروجين -210°C) . ماذا سيكون ضغط النيتروجين فى الأنبوبة عند تسخينها إلى درجة 27°C إذا كانت كتلة القطرات 0.08 g ؟

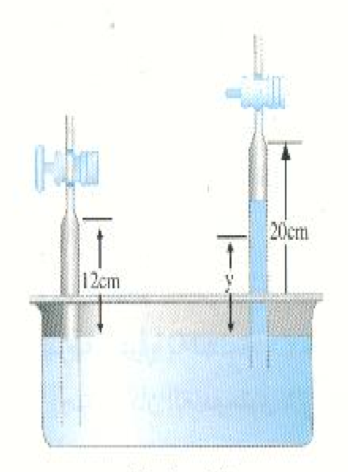
■■ 58 ـ يمثل الشكل م1–10 كباسًا لا احتكاكيًا مساحته A وكتلتـه M يفصـل بـين حجمين متساويين V_0 من غاز مثالي ضغطه P_0 . قلبت الأسطوانة الآن لتسـتقر على إحدى القاعدتين . أوجد الحجم العلوى عند الاتزان بدلالة P_0 و V_0 .

كباس

شكل م1–10

■■ 59 ـ ملأ بالون كروى الشكل ($V = 5\ m^3$) بغاز الـهليوم ($M = 4.0$ kg/kmol) فى يوم كان الضغط فيـه 1 atm ودرجـة الحـرارة فيـه 0°C . (أ) مـا عـدد الكيلو جرامات من الـهليوم فى البالون إذا كان البالون يطفو فى الـهواء ؟ إهمل كتلة البالون . (ب) ما ضغط الـهليوم فى البالون ؟

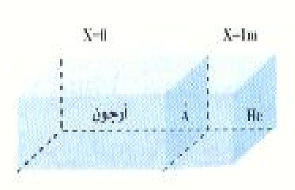
■■ 60 ـ وضعت فتحة أنبوبة منتظمة المقطع ذات محبس مفتوح كما بالشكل م2–10 فى الزئبق ثم خفضت فيه رأسيًا بحيث تبقى بالأنبوبة طول قدره 12 cm دون أن يمتلأ بالزئبق . وبعد إغلاق المحبس رفعت الأنبوبة رأسيًا إلى أعلى مسافة قدرها 8 cm . ما هو ارتفاع الزئبق y فى الأنبوبة ؟ اعتبر أن الضغـط ودرجـة الحرارة هما القيمتان القياستان .



شكل م2–10

■■ 61 ـ عندما ارتفعت درجة الحرارة من 27°C إلى 750 K عند ضغط قدره 1 atm لوحظ أن وعاء يحتوى على الـهواء يتمدد مـن 22 liters إلى 53.6 liters . هل هناك أى تسـرب للـهواء من الوعاء ؟ وإذا كان هناك تسرب بالفعل ، فما هى كمية الـهواء المتسربة من أو إلى الوعاء فى هذه العملية ؟

■■ 62 ـ افترض أن لديك صندوقًا معزولاً طوله 1 m ومساحة مقطعه A ، وأن الصندوق مقسوم إلى قسمين بواسطة فاصل معـزول سدود للغاز كما هو مبين بالشكل م3–10 . فإذا كان القسم الأيسر يحتوى على 105 g من غـاز الأرجـون عنـد 300 K ، وكان القسم الأيسر يحتوى على 15 g غاز الـهليوم عند 260 K . أين سيكون موضع الكباس القابل للحركة اللااحتكاكية . بفرض أن درجتى الحرارة تظلان ثابتتين .



شكل م3–10

■■ 63 ـ يتكون جو كوكب الزهرة كله تقريبًا (96 %) من CO_2 ، ودرجة حرارة سطحه 750 K تقريبًا وضغطـه حـوالى 90 مـرة قدر الضغط الجوى على الأرض . أوجد كثافة CO_2 والسرعة rms لجزيئات CO_2 على سطح الزهرة .

■■ 64 ـ استخدمت أنبوبة صغيرة فى توصيل إناء حجمه 2.0 liters يحتوى على غاز مثالى ضغطه 240 kPa ودرجة حرارته 20°C بإناء آخر حجمه 8 liters يحتوى علـى نفس الغاز عند درجة حرارة قدرها 27°C وضغط قـدره 100 kPa ، وبعد وصول الغاز إلى حالة الاتزان أصبحت درجة حرارته 23°C . ما هو الضغط النهائى للغاز ؟



عند مناقشة تأثير الحرارة على الغازات فى الفصل السابق تعاملنا مع ذرات وجزيئات الغاز باعتبارها كرات مصمتة مرنة تنطلق كالسهام هنا وهناك ، كما أهملنا حقيقة أن الذرات والجزيئات لها تركيب داخلى ، وأن طاقتها يمكن أن تتضمن أنواعًا أخرى من الطاقة خلاف طاقة الحركة الانتقالية . وباستخدام مثل هذا التبسيط للأمور تمكن الباحثون الأوائل من تحقيق اتفاق جيد بين النظرية والتجربة فى حالة كثير من الغازات . ولكن فى حالة السوائل والجوامد تؤدى تعقيدات كثيرة أخرى إلى تأثير واضح محسوس على سلوك الذرات والجزيئات . ومن ثم يمكن القول أن الفروض المستخدمة فى وصف الغازات المثالية غير مناسبة أو ملائمة لتفسير النتائج العملية تفسيرًا صحيحًا . لنحاول الآن مناقشة كيفية وصف الخواص الحرارية لهذه الأنظمة الأكثر تعقيدًا .

11-1 مفهوم الحرارة

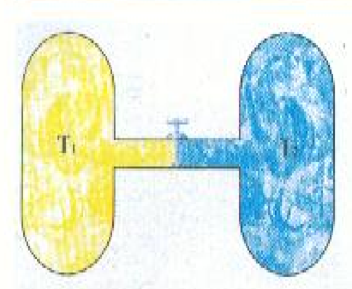
يعلم الإنسان منذ زمن طويل أنه من الممكن استخدام الأجسام الساخنة لتسخين الأجسام الباردة . ولكن فهم العمليات المتعلقة بهذا الموضوع فهمًا حقيقيًا لم يتحقق بالفعل إلا فى منتصف القرن العشرين . وليس من الغريب أن فهمنا لطبيعة الحرارة قد تطور بصورة سريعة مع ظهور نظرية الحركة للغازات . وقد رأينا فى الفصل السابق أن نظرية الحركة تؤدى مباشرة إلى معنى فيزيائى محدد لدرجة الحرارة ؛ ذلك أن درجة الحرارة المطلقة T لغاز تتناسب طرديًا مع متوسط طاقة الحركة الانتقالية للجزئ فى الغاز . وقد استنتجنا

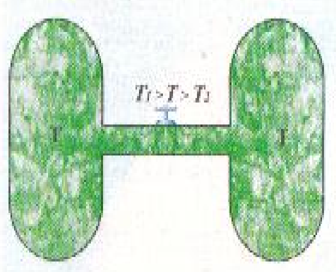
كذلك أن متوسط طاقة الحركة الانتقالية لجزئ فى الغاز كتلتـه m_0 يمكـن إيجادهـا مـن العلاقة :

$$\left(\frac{1}{2}m_0v^2\right)_{av} = \frac{3}{2}kT \tag{4-10}$$

حيث $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K هو ثابت بولتزمان .

لنفرض الآن أننا قد سمحنا لغازين فى إنائين درجتـا حرارتـهما الأصليتـان T_1 و T_2 $(T_1 > T_2)$ بالاختلاط أحدهما مع الآخر ، كما هو مبين بالشكل 1-11 . تبين التجربـة أن درجة حرارة الخليط تتغير مع الزمن ، ولكن بعد مرور زمن معين سوف تصل درجـة حرارة الخليط إلى قيمة نهائية T تقع بين T_1 و T_2 . ويمكن تفسير هـذا السلوك بدلالـة متوسط طاقة حركة الجزيئات طبقًا لنظرية الحركة كالتالى . بعد اختلاط الغازين تتصـادم جزيئات الغاز 1 ذات الطاقة العالية بجزيئات الغاز 2 ذات الطاقة المنخفضة . وفى هذه التصادمات تفقد الجزيئات عالية الطاقة بعض طاقتها (مع انخفاض درجة حرارتها) وتكتسب الجزيئات منخفضة الطاقة تلك الطاقة (وبذلك ترتفع درجة حرارتها) . ويستمر هذا التبادل فى الطاقة بين الغازين حتى يتساوى متوسط طاقة حركتـهما ويصـل الخليـط إلى حالة تثبت فيها درجة الحرارة عند T حيث $T_1 > T > T_2$ ، وفى هذه الحالـة لـن تسبب التصادمات بين جزيئات الغازين أى فقد أو كسب فى متوسط طاقة الحركة . هذا أيضًا هو نفس ما يحدث عند تلامس السوائل أو الجوامد المختلفة فى درجة الحرارة .





شكل 1-11:
عندما يتلامس الغازان أحدهما مع الآخـر ، تسبب التصادمات بين الجزيئات ذات الطاقـة العالية (ودرجة حرارتها T_1) والجزيئـات ذات الطاقة المنخفضة (ودرجة حرارتها T_2) تغير متوسط طاقة الحركـة الجزيئيـة فـى الأسطوانتين باستمرار إلى أن تثبـت درجـة الحرارة .

بناء على ذلك وغيره من الاعتبارات الأخرى يستنتج أنه إذا تلامس جسمان مختلفين فى درجة الحرارة فإن الطاقة تنتقل ، أو **تسرى** ، من الجسم الأسـخن إلى الجسم الأبـرد . **هذه الطاقة المتبادلة فى مثل هذا الموقف هى ما يعرف بالحرارة .**

الطاقـة الحراريـة هـى الطاقـة التـى تنتقـل مـن جسـم سـاخن إلى جسم بـارد نتيجـة للاختلاف بين درجتى حرارة الجسمين .

ويترتب على ذلك أنه :

إذا تساوت درجتا حرارة الجسمين المتلامسين فلن يحدث بينهما أى تبادل للطاقة .

هذه الحالة التى لا يحدث فيها تبادل للطاقة بين جسمين متسـاويين فى درجـة الحـرارة هى ما يعرف باسم **الاتزان الحرارى** . ويعتبر مفهوم الاتزان الحرارى أساس ما يسمى **بالقانون الصفرى للديناميكا الحرارية** .

إذا وجد جسمان كل على حدة فى حالة اتزان حرارى مع جسم ثالث فإنهما يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

قد تبدو هذه العبارة واضحة* ، ولكنها الأساس الفيزيائى الذى يمكننا من قياس درجة

* الواقع أن هذه العبارة كـانت مـن البديـهيات المسلم بـها إلى أن اكتشـف القـانون الأول للديناميكـا الحرارية ، وهنا أصبحت الحاجة ملحة لوضع تعريف صريح لدرجة الحرارة على أساس الاتزان الحـرارى . لذلك سمى هذا التعريف بالقانون « الصفرى » على أن يفهم ضمنيًا أنه القانون الأول .

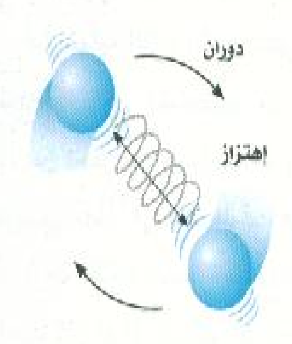
الحرارة باستخدام الترمومترات . فإذا وصل ترمومتر (الجسم الثالث) إلى حالة اتزان حرارى مع جسمين وكانت قراءته واحدة فى الحالتين فإننا نستنتج أن الجسمين متساويان فى درجة الحرارة بدون أن نحتاج إلى وضعهما فى حالة تلامس .

11-2 الطاقة الحرارية

لندرس الآن ما يحدث عند انتقال الطاقة إلى المادة ، ولتكن بدايتنا بغاز أحادى الذرة كالهليوم . يمكننا كتقريب أول اعتبار أن كل ذرة من الغاز تتصرف كما لو كانت كرة صلدة تنطلق كالسهم هنا وهناك . ورغم أن هذه الذرة لها طاقة حركة دورانية نتيجة لحركتها المغزلية حول محورها ، فإن هذه الطاقة $\left(\frac{1}{2}I\omega^2\right)$ صغيرة جدًا لأن عزم القصور الذاتى للذرة صغير جدًا جدًا . ومن ثم يمكن إهمال طاقة الحركة الدورانية بالنسبة إلى طاقة الحركة الانتقالية . يمكننا القول إذن أن الطاقة الكلية للجزئ أحادى الذرة تساوى طاقة حركتها الانتقالية فقط .

أما فى حالة الجزيئات ثنائية الذرة ، كجزيئات الأكسجين O_2 والنيتروجين N_2 ، فإن عزم القصور الذاتى يكون كبيرًا ، وذلك لوجود مسافة فاصلة بين الذرتين المكونتين للجزئ . ونتيجة لذلك ستكون طاقة حركتها الدورانية مقارنة بطاقة حركتها الانتقالية ولا يمكن إهمالها .

إضافة إلى طاقتى الحركة الانتقالية والدورانية فإن الجزيئات ثنائية الذرة تمتلك نوعًا ثالثًا من الطاقة هو الطاقة الاهتزازية . فنظرًا لوجود الرابطة الكيميائية بين ذرتى الجزئ ، والممثلة بالزنبرك فى الشكل 2-11 ، يمكن لهاتين الذرتين أن تتذبذبا على استقامة الخط الواصل بينهما بطريقة تشبه كثيرًا تذبذب كتلتين مثبتتين فى طرفى زنبرك مرن . وتتكون الطاقة الاهتزازية للجزئ ، أو لأى نظام متذبذب عمومًا ، من طاقة الحركة المرتبطة بحركة الذرتين وطاقة الجهد المرتبطة باستطالة أو انضغاط الرابطة . يمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أن الطاقة المضافة إلى غاز ثنائى الذرة لن تظهر كلها فى صورة طاقة حركة انتقالية للجزيئات كما فى حالة الجزئ أحادى الذرة ، بل إن جزءًا منها سوف يتحول إلى صور أخرى من الطاقة الداخلية (أى إلى طاقة دورانية واهتزازية) .



شكل 2-11:
جزئ الغاز ثنائى الذرة له طاقة حركة انتقالية وطاقة حركة دورانية ، كما أن له طاقة حركة اهتزازية مرتبطة بالرابطة شبه الزنبركية بين ذرتيه .

ويصبح الموقف أكثر صعوبة عندما ننتقل إلى الغازات عديدة الذرات ، والتى تكون جزيئاتها أكثر تعقيدًا من الجزيئات ثنائية الذرة . ففى هذه الحالة يمكن للجزيئات أن تتذبذب أو تدور بعدة طرق مختلفة ، قد تكون كثيرة فى بعض الأحيان ؛ ولهذا يكون نصيب طاقة الحركة الانتقالية من الطاقة المضافة إلى المادة أقل مما فى الحالتين السابقتين . ويمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أنه كلما كانت جزيئات الغاز أكثر تعقيدًا ، كلما زادت كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز بمقدار معين ؛ وسوف تكون هذه العلاقة بين الحرارة المضافة والارتفاع الناتج فى درجة الحرارة موضوع القسم 4-11 .

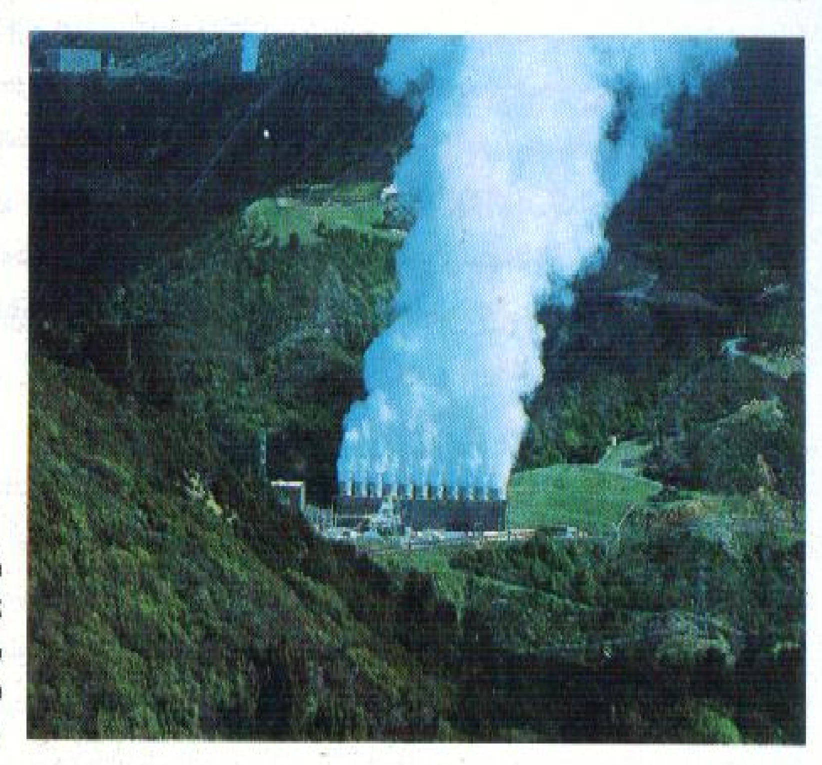
ويتعقد الموقف تمامًا فى حالة السوائل والجوامد . فبالإضافة إلى الروابط الكيميائية الموجودة داخل الجزيئات ذاتها ، هناك روابط بين الجزيئات المتجاورة . ومن ثم فإن الحرارة المضافة يمكن أن تؤدى إلى أنواع عديدة من الحركة داخل حجم المادة . وفى جميع الحالات تتغير هذه الحركات بصورة مستمرة نتيجة للتصادمات العشوائية للذرات المتحركة ولن يكون لها اتجاه ثابت . هذه الحركات العشوائية تسمى **بالحركات الحرارية** ؛ كما تعرف الطاقة المرتبطة بهذه الحركات العشوائية **بالطاقة الحرارية** ، وهو ما أشرنا إليه فى الفصل الخامس عند مناقشة تأثير القوى الاحتكاكية .

هناك فرق هام بين **الحرارة والطاقة الحرارية** . فالحرارة هى الطاقة التى تنساب من جسم إلى آخر نتيجة لاختلاف درجتى حرارتهما . أما الطاقة الحرارية فهى الطاقة التى تحتويها المادة بفضل الحركات العشوائية لذراتها وجزيئاتها . وعندما تضاف الحرارة إلى مادة ما قد يستهلك جزء منها فى بذل شغل ميكانيكى ، كما فى حالة حركة كباس نتيجة للتمدد الحرارى لغاز مثلاً . وعليه فليس من المحتم أن تتحول كل الحرارة المضافة إلى طاقة حرارية .

الطاقة الحرارية هى الطاقة المرتبطة بالحركة العشوائية للذرات والجزيئات .

ومن الجدير بالملاحظة أن الحرارة المنتقلة إلى المادة تتحول فى أغلب الأحيان إلى طاقة حرارية ، ولكن هناك احتمالات أخرى سوف نناقشها فيما بعد . كذلك يمكن أن تزداد الطاقة الحرارية للمادة بطرق ميكانيكية أو بإضافة الحرارة إليها على السواء .

قبل نهاية القرن الثامن عشر كانت دراسة الحرارة منفصلة تمامًا عن دراسة الميكانيكا . وفى الثمانينيات من ذلك القرن كان الفيزيائى الأمريكى بنيامين طومسون أول من تحقق من وجود علاقة وثيقة بين الشغل الميكانيكى وتولد الحرارة . كان طومسون يعمل فى ذلك الوقت فى مجال حفر مواسير المدافع فى بافاريا ، ولاحظ أن درجة حرارة الماسورة ترتفع بشكل ملحوظ أثناء عمل آلة الحفر . وقبل ذلك الوقت كان الرأى السائد عن الحرارة أنها عبارة عن مائع يسمى **الكالوريك** ، أو السيال الحرارى ؛ وأن الأجسام الساخنة تحتوى على الكالوريك بعكس الأجسام الباردة التى لا تحتوى عليه . فإذا تلامس جسم ساخن بآخر بارد ، سوف ينساب الكالوريك من الجسم الساخن إلى البارد ويستمر ذلك إلى أن تتساوى درجتا حرارتهما . ولكن مشاهدات طومسون أثبتت أن الحرارة يمكن أن **تتولد** بواسطة قوى الاحتكاك الميكانيكى . وبحلول منتصف القرن التاسع عشر أثبتت تجارب الفيزيائى الإنجليزى جيمس برسكوت جول وجود تكافؤ دقيق بين الوحدات الميكانيكية للطاقة والوحدات الحرارية للحرارة .



فى بعض المواقع ، كهذا الموقع فى كاليفورنيا ، تكون الطاقة الحرارية فى باطن الأرض (الطاقة الجيوحرارية) قريبة جدًا من سطح الأرض بحيث يمكن استخدامها فى توليد الكهرباء .

يعلم الكشافون جميعًا أنه يمكن إشعال النار بحك قطعتين من الخشب الجاف سويًا بشدة . ما يحدث فى هذه الحالة هو أن الاحتكاك الميكانيكى يسبب تحرك الجزيئات على سطحى قطعتى الخشب حركة عشوائية عنيفة . وهذه تكون الطاقة الحرارية الإضافية . ويمكن القول عمومًا أن فواقد الطاقة الميكانيكية المرتبطة بالاحتكاك تظهر على هيئة حرارة . هذا ويؤكد لنا قانون بقاء الطاقة أن الطاقة الميكانيكية المفقودة تؤدى إلى زيادة الطاقة الحرارية بنفس المقدار .



تعتبر الشهب ، أو ما يسمى أحيانًا بالنيازك ، أمثلة درامية لتحول طاقة الحركة إلى طاقة حرارية . فعندما تدخل هذه القطع الصغيرة من المادة الغلاف الجوى للأرض يتسبب احتكاكها مع الهواء فى تسخينها وتبخرها .

خلافات في الفيزياء : طبيعة الحرارة

يعتبر الإحساس بالحرارة والبرودة واحدًا من أهم الأحاسيس لدى الإنسان وأكثرها أساسية . وتشير المراجع إلى أن البحث فى طبيعة الحرارة يعود على الأقل إلى القرن الأول قبل الميلاد ، حيث كتب الشاعر الرومانى لوكريتيوس أن الحرارة ما هى إلا مادة كغيرها من المواد . ولكن الاقتناع بأن الحرارة صورة من صور الطاقة لم يتحقق إلا فى حوالى منتصف القرن التاسع عشر . وتوضح قصة الأفكار المتنافسة عن طبيعة الحرارة ووجهات النظر المؤيدة لكل منها الطبيعة الحقيقية للتقدم العلمى ؛ ليس هذا فقط ، ولكنها أيضًا موضوع فى غاية الأهمية . ويعتبر المؤرخ كاجورى أن القانون الأول للديناميكا الحرارية « أعظم تعميم تحقق فى الفيزياء فى القرن التاسع عشر » . فنحن الآن نعيش فى عصر يعتمد اعتمادًا أساسيًا على تحويل الحرارة إلى شغل ميكانيكى (آلات الاحتراق الداخلى والتوربينات البخارية على سبيل المثال) ، بحيث يمكن وصف اقتصادنا المعاصر بأنه « اقتصاد ديناميكى حرارى » .

وكانت هناك نظريتان متنافستان أساسيتان للحرارة : الأولى هى نظرية السيال الحرارة المادى (الكالوريك) ، والثانية نظرية الطاقة التى تعتبر أن الحرارة تتمثل فى حركة جزيئات المادة . ويعتبر ديسكارتس وبويل ونيوتن من أشهر علماء القرن السابع عشر الذين تزعموا الاتجاه الثانى ، إذ كانت وجهة نظرهم أن الحرارة هى الحركة الاهتزازية لجسيمات المادة . ولكن هذه النظرية كانت تفتقر إلى الأساس العلمى الرصين الذى يمكن أن يدعمها ، ولذلك نبذت خلال القرن الثامن عشر وسادت نظرية الكالوريك . وقد شهدت هذه الفترة بالتحديد ابتكار الآلة البخارية على يدى كل من توماس نيوكومن فى انجلترا وجيمس واط فى اسكتلندا .

تفترض نظرية الكالوريك فرضين أساسين : (1) أن الكالوريك مائع (سائل) له القدرة على اختراق جميع الفراغات ، كما يستطيع الانسياب إلى جميع الأجسام إلى الداخل أو إلى الخارج ، (2) أن الكالوريك ينجذب بشدة إلى المادة ، ولكنه يتنافر مع نفسه . وطبقًا لهذه النظرية يتعين تركيب المادة باتزان التجاذب التثاقلى للذرات تجاه بعضها البعض والتنافر الذاتى للكالوريك الموجود بالجسم . (تذكر أن التركيب الكهرومغناطيسى للمادة لم يكن معروفًا فى ذلك الوقت ، وأن قياس شدة قوة التجاذب التثاقلى G لم يتحقق قبل نهاية القرن) . هذا وقد طبقت فكرة المائع « غير القابل للوزن » والذى يتخلل المادة مرات كثيرة فى التاريخ محاولة لتفسير العديد من الظواهر الفيزيائية .

وقد نجحت نظرية الكالوريك فى تفسير كثير من الحقائق المشاهدة عمليًا . فالأجسام الساخنة تحتوى على كمية أكبر من الكالوريك ، بينما تحتوى الأجسام الباردة إلى كمية أقل منه . كما أمكن تفسير تسخين الأجسام أو تبريدها بزيادة كمية الكالوريك فى الجسم نتيجة لانسيابه إلى داخل الجسم ، أو بنقص كميته نتيجة لانسيابه إلى خارج الجسم . وعند ارتفاع درجة الحرارة سوف تسبب الزيادة فى كمية الكالوريك تمدد الجسم بسبب التنافر الذاتى للكالوريك . كذلك فإن انصهار الجوامد قد أمكن تفسيره بأن كمية الكالوريك فى الجسم تزداد زيادة هائلة عند نقطة الانصهار ، وتزداد تبعًا لذلك قوة التنافر الذاتية للكالوريك بحيث يمكنها التغلب على قوى التجاذب التى تحفظ الذرات فى أماكنها ، وبذلك يحدث الانصهار . أما فى المواد الغازية فإن التاثيرات التجاذبية بين الذرات تكون مهملة .

ولكى يتسع نطاق تطبيقات نظرية الكالوريك قام الاسكتلندى جوزيف بلاك بتقسيم الكالوريك إلى صنفين متميزين : الكالوريك **الكامن** والكالوريك **المحسوس** ، حيث يرتبط الكالوريك المحسوس بالتغيرات فى درجة الحرارة . أما الحرارة المرتبطة بعملية تحول طورى كالتجمد فقد أمكن تفسيرها بأن الكالوريك يتحد فى الحقيقة مع الذرات فى هذه العملية متحولاً من كالوريك محسوس إلى كالوريك كامن ؛ ويحدث العكس تمامًا فى عملية التحول الطورى العكسى ، إذ يتحول الكالوريك مرة ثانية من الصورة المحسوسة إلى الكامنة . كذلك أمكن تفسير تولد الحرارة بالطرق أو الحك بأن ذلك يحدث نتيجة « لاعتصار » بعض الكالوريك المحسوس من المادة الصلبة . وبطريقة مشابهة أمكن أيضًا تفسير ارتفاع درجة غليان المادة بزيادة الضغط ،

فعندما يزداد الضغط المؤثر على المادة قرب نقطة الغليان تسبب الزيادة فى الضغط اعتصار بعض الكالوريك المحسوس من المادة ، ولهذا يتحتم أن تصل درجة حرارة المادة إلى قيمة أعلى حتى تسترد ما يكفى من الكالوريك لتبخيرها .

كان الأمريكي بنيامين طومسون ، والمشهور باسم كونت رمفورد ،٠أول من هاجم نظرية الكالوريك هجومًا عمليًا مركزًا فى نهاية القرن الثامن عشر . ففى عام 1775 غادر طومسون أمريكا إلى أوروبا ، حيث أنعم عليه أمير بافاريا بلقب كونت فى عام 1790 تقديرًا لإنجازاته القيمة خلال سنوات طويلة . وبينما كان طومسون يقوم بعمله المعتاد فى الإشراف على ثقب مواسير المدافع العملاقة ، أجرى هذا الرجل العديد من التجارب التى أثبتت أن هناك علاقة وثيقة بين الشغل الميكانيكى المبذول بواسطة المثقاب وتولد الحرارة بشكل غير محدود ؛ فقد لاحظ أن الحرارة تتولد باستمرار أثناء عمل المثقاب ويتوقف تولدها بتوقفه . وبناء على ذلك نبذ رمفورد فكرة أن الحرارة تأتى من مصدر محدود للكالوريك يحتوى عليه معدن الماسورة .

كذلك أجرى رمفورد بعض التجارب التى قام بتصميمها لقياس وزن السيال الحرارى . وتتلخص فكرة هذه التجارب فى محاولة قياس أى فرق فى الوزن بين الأجسام الساخنة والباردة ، وخاصة الفرق فى وزن الماء عند التحول الطورى . كانت تجارب رمفورد فى غاية الدقة ؛ ومع ذلك لم تبين هذه التجارب حدوث أى تغير فى الوزن نتيجة لانسياب الكالوريك المفترض داخل أو خارج عيناته . هذه التجارب وغيرها من التجارب المتعلقة بالتوصيل الحرارى أقنعت رمفورد أن الحرارة ناتجة عن **الحركة الجزيئية** وليست ناشئة عن مادة عديمة الوزن لا ينضب لها معين . ومما يثير الدهشة والسخرية فى نفس الوقت أن يتزايد عدد مؤيدى نظرية الكالوريك خلال النصف الأول من القرن التاسع عشر ؛ هذا بالرغم من العديد من العلماء البارزين المؤيدين لرمفورد ، مثل السير همفرى دافى وتوماس يونج .

كان الفيزيائى الإنجليزى جيمس بريسكوت جول (1818 – 1889)أول من أثبت التكافؤ الكمى بين الشغل الميكانيكى وتوليد الحرارة . وقد أجرى جول تجاربه فى توليد الحرارة باستخدام التيار الكهربائى واحتكاك المياه المتدفقة وانضغاط الهواء وتأثير العجلات ذات البدالات أثناء تقليب الماء . وقد أعلن جول قياساته للمكافئ الميكانيكى للحرارة فى أكسفورد عام 1849 . ولا ننسى هنا أن نشير إلى ما لقيه جول من التقدير العظيم والاهتمام البالغ من قبل الشاب وليام طومسون ، لورد كلفن فيما بعد ، وهو أحد أشهر رجال العلم فى إنجلترا . هذا وقد قام آخرون ، وخصوصًا الفيزيائى الأمريكى هنرى رولاند ، بتنقيح نتائج تجارب جول الأولى . وسوف يظل عام 1847 هو التاريخ الحقيقى الذى شهد التأكيد النهائى الحاسم للقانون الأول للديناميكا الحرارية ، والذى يتعامل مع الحرارة باعتبارها طاقة داخلية ميكانيكية . وفى الحقيقة فإن الصيغة التى تعبر عن التكافؤ الميكانيكى للحرارة ، 1 kilocalorie = 4184 N.m ، والتى تبدو الآن عادية تمامًا ، تعتبر واحدة من أهم صيغ الميكانيكا الكلاسيكية . لا عجب إذن أن يطلق اليوم على الوحدة نيوتن ـ متر اسم **الجول** .

11-3 وحدات الحرارة

حيث أن الحرارة والطاقة الحرارية صورتان من صور الطاقة ، فإن وحدتهما الأساسية فى النظام SI هى الجول . ومع ذلك فإن هناك وحدات أخرى لقياس الحرارة تسمى **الوحدات الحرارية** ، وقد كانت هذه الوحدات تستخدم على نطاق واسع قبل أن يعرف أن الحرارة صورة من الطاقة . ونظرًا لأن هذه الوحدات مازالت تستعمل كثيرًا حتى الآن ، فلا بأس من الإشارة إليها هنا باختصار .

أولى هذه الوحدات هى **السعر** (cal) ، والتعريف الأصلى للسعر هو أنه كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة جرام واحد من الماء درجة سيليزية واحدة (1°C) .

أما السعر الغذائى فيساوى 1000 cal ، أى **كيلو سعر** (kcal) واحد ، وهو يكتب بالحرف الكبير هكذا Cal ويسمى أيضًا بالسعر الكبير . وهناك أيضًا وحدة حرارية أخرى تسمى **الوحدة الحرارية البريطانية و ح ب (Btu)** ؛ والتعريف الأصلى لهذه الوحدة هو أنها كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة باوند واحد من الماء بمقدار درجة فهرنهيتية واحدة (1°F) .

وبعد أن تأكد أن الحرارة صورة من الطاقة ، قام طومسون وجول بإجراء قياسات عديد لتعيين **المكافئ الميكانيكى للحرارة** ، والذى يمكن استخدامه لتحويل الوحدات الحرارية التقليدية إلى جولات . واليوم يعرف السعر (cal) والوحدة الحرارية البريطانية (Btu) بدلالة الجول :

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1054 \text{ J}$$

11-4 السعة الحرارية النوعية

لكى نرفع درجة حرارة جسم ما يجب علينا أن نزيد الطاقة الحرارية لجزيئاته ، ويمكن تحقيق ذلك بالسماح للحرارة بأن تنساب إلى هذا الجسم من جسم آخر أكثر سخونة . وبالمثل ، إذا أردنا تبريد جسم ما فإننا نستطيع ذلك بالسماح للحرارة بأن تنساب من هذا الجسم إلى جسم آخر أكثر برودة . ولكى يمكننا وصف عمليات التسخين والتبريد هذه وصفًا كميًا يجب معرفة كمية الحرارة اللازمة لتغيير درجة حرارة الجسم .

تعرف كمية الحرارة التى يجب أن تنساب من أو إلى وحدة الكتلة من المادة حتى تتغير درجة حرارتها بمقدار درجة واحدة باسم السعة الحرارية النوعية للمادة .

وبناء على ذلك ، عندما تنتقل كمية من الحرارة Q إلى كتلة قدرها m من المادة ، سوف ترتفع درجة حرارة هذه الكتلة بمقدار ما ، وليكن ΔT . إذن : من التعريف* :

$$\text{السعة الحرارية النوعية } c = \frac{Q}{m\Delta T}$$

ومنه يمكننا كتابة :

$$Q = cm\Delta T \qquad (11\text{-}1)$$

ويمكننا أن نرى من التعريف أن وحدات السعة الحرارية النوعية هى J/kg.C° ، هذا رغم أن الوحدات الشائع استعمالها هى cal/g.C° . وعليك أن تثبت بنفسك أن :

$$1 \text{ cal/g.C°} = 4184 \text{ J/kg.C°}$$

* يمثل الرمز Q كمية الحرارة المنتقلة إلى المادة . وتعنى الإشارة الموجبة للكمية Q أن الحرارة تضاف إلى المادة ، أما إذا كانت Q سالبة فذلك يعنى أن المادة تلفظ الحرارة خارجها . أما الرمز ΔT فيمثل التغير فى درجة الحرارة نتيجة للانتقال الحرارى .

يمثل الجدول 1-11 قيم c النموذجية لبعض المواد . لاحظ أن $c = 1.000\ cal/g.C°$ فى حالة الماء . وسوف نرى فيما بعد أن السعة الحرارية النوعية تتغير تغيرًا طفيفًا مع درجة الحرارة ، ولكن يمكن اعتبار أن القيم المعطاة بالجدول ثابتة بالقرب من درجة الغرفة . ويلاحظ أنه إذا كانت قيمة c كبيرة فذلك يعنى أن المادة تحتاج إلى كمية كبيرة نسبيًا من الحرارة لكل جرام كى تتغير درجة حرارتها بمقدار معين . كذلك فإن صغر قيمة c يعنى أن درجة حرارة المادة T تتغير بمقدار كبير عندما تمتص المادة كميات صغيرة نسبيًا من الحرارة . وبناء على ما سبق مناقشته فى الجزء 2-11 يمكننا أن نتوقع أن الحرارة النوعية للغازات ذات الجزيئات المعقدة أكبر مما فى حالة الغازات البسيطة أحادية الذرة . ذلك أن الحرارة الممتصة تتوزع بين العديد من أنواع الطاقة الداخلية ، وهذا ما سوف نتناوله بالمناقشة تفصيلاً فى الفصل الثانى عشر .

جدول 1-11 : السعة الحرارية لبعض المواد

المادة	$c\ (cal/g.C°)$	$c\ (J/kg.C°)$
ماء	1.000	4184
جسم الإنسان	0.83	3470
كحول إيثيلى (إيثانول)	0.55	2300
بارافين	0.51	2100
ثلج (0°C)	0.50	2100
بخار (100°C)*	0.46	1920
ألمنيوم	0.21	880
زجاج	0.15	600
حديد	0.11	460
نحاس	0.093	390
زئبق	0.033	140
رصاص	0.031	130

* عند ثبوت الحجم

مثال 1-11 :

ما هى كمية الحرارة اللازمة لتغير درجة حرارة (أ) 400 g من الماء من 18.0°C إلى 23.0°C ؟ (ب) 400 g من النحاس من 23.0°C إلى 18.0°C ؟

استدلال منطقى :

1

سؤال : ما هى العلاقة بين كمية الحرارة المضافة والتغير فى درجة الحرارة ؟

الإجابة : تحتوى هذه العلاقة على كتلة المادة وحرارتها النوعية :

$$Q = cm\ \Delta T$$

سؤال : ما هى الوحدات اللازم استخدامها ؟

الإجابة : يجب أن تتفق وحدات الحرارة النوعية مع وحدات كل من m و Q . ولدينا بالجدول 1-11 اختياران لهذه الوحدات .

الحل والمناقشة :

(أ) $$Q = (1.00 \text{ cal/g . C°})(400 \text{ g})(+5.00 \text{ C°}) = 2000 \text{ cal}$$

وباستخدام الوحدات SI :

$$Q = (4184 \text{ J/kg . C°})(0.400 \text{ kg})(+5.00 \text{ C°}) = 8370 \text{ J}$$

(ب) لاحظ أن $\Delta T = -5.00\ C°$ ، وأن c هنا هى الحرارة النوعية للنحاس :

$$Q = (0.093 \text{ cal/g . C°})(400 \text{ g})(-5.00 \text{ C°}) = -190 \text{ cal} = -780 \text{ J}$$

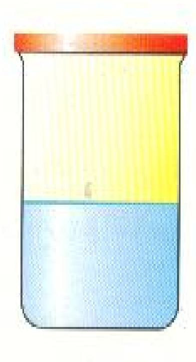
فى الجزء (أ) تكون الحرارة مضافة إلى الماء (إشارة Q موجبة) ، وفى الجزء (ب) تلفظ الحرارة من النحاس (إشارة Q سالبة) .

تمرين : عين درجة الحرارة النهائية لكمية قدرها 700 g من النحاس تضاف إليها كمية من الحرارة قدرها 400 J إذا كانت درجة حرارتها الأصلية 16.0°C . **الإجابة** : 17.5°C .

5-11 الغليان وحرارة التبخير

لنناقش الآن ما يحدث عندما يتبخر سائل ما . من المعلوم أن جزيئات السائل تؤثر على بعضها البعض بقوى تجاذبية متبادلة قوية إلى حد ما . (قوى التجاذب ذات طبيعة كهربائية أساسًا) . وإذا نظرنا إلى الجزيئات الموجودة على سطح السائل سنجد أن الغالبية العظمى منها لا تستطيع الهرب إلى المنطقة الواقعة خارج السطح . ولكن ، كما فى حالة الغازات ، يحدث أن يكتسب القليل من هذه الجزيئات طاقة كبيرة جدًا بسبب الحركة الحرارية ، وهذا ما نوقش تفصيلاً فى الجزء 6-10 . ونتيجة لذلك يمكن أن تهرب مثل هذه الجزيئات من سطح السائل متحولة بذلك من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية ، وتسمى هذه العملية **بالتبخير أو التصعيد** .

ونظرًا لأن أعلى الجزيئات طاقة هى وحدها التى تهرب من السطح ، فإن ذلك يؤدى إلى نقص متوسط طاقة الجزيئات المتبقية مع استمرار عملية التبخر . ومن ثم فإن درجة حرارة السائل المعزول يجب أن تقل نتيجة للتبخر ؛ وذلك لأن درجة الحرارة ، كما نعلم ، مقياس لطاقة حركة الجزيئات . وهكذا نكون قد وصلنا إلى تفسير تلك الحقيقة المعروفة بأن التبخر يسبب تبريدًا للسائل .



شكل 3-11:
عندما يكون البخار مشبعًا داخل إناء مغلق ، يتساوى عدد الجزيئات المتبخرة من السائل تمامًا مع عدد الجزيئات المتكثفة من البخار إلى السائل .

بناء على ذلك يمكن القول أنه إذا أريد لجزيئات السائل أن تهرب من سطح السائل فإن من الضرورى تزويدها بالطاقة اللازمة . وتعرف كمية الطاقة اللازمة لذلك ، والتى تختلف من مادة إلى أخرى ، باسم حرارة التبخير ، وتعريفها كالتالى :

تسمى الطاقة اللازمة لتحويل وحدة الكتلة من المادة من الطور السائل إلى الطور البخارى (الغازى) بحرارة تبخير (H_v) تلك المادة .

$$Q = mH_v \qquad (11\text{-}2)$$

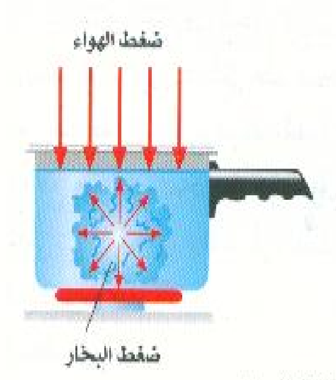
وعندما تتكثف وحدة الكتلة من المادة من الطور البخارى إلى الطور السائل سوف تنطلق نفس هذه الكمية من الطاقة من المادة ؛ ويوضح الجدول 2-11 قيم H_v لبعض المواد المألوفة .

جدول 2-11 حرارة التبخير وحرارة الانصهار لبعض المواد المألوفة

المادة	نقطة الانصهار (°C)	نقطة الغليان (°C)	H_v cal/g	H_v kJ/kg	H_f cal/g	H_f kJ/kg
هليوم	-270	-269	21	5.0	5.2	1.25
أكسجين	-219	-183	210	51	13.8	3.3
نيتروجين	-210	-196	200	48	25.5	6.1
إيثانول (كحول إيثيلى)	-114	78	854	204	105	25
زئبق	-39	357	270	65	11.7	2.8
ماء	0	100	2260	539	335	80
رصاص	357	1750	858	205	23	5.9
ألمنيوم	660	2450	10500	2520	397	95
ذهب	1063	2660	1580	377	64	15.4
نحاس	1083	2595	4810	1150	205	49

* عند ضغط قدره 1atm

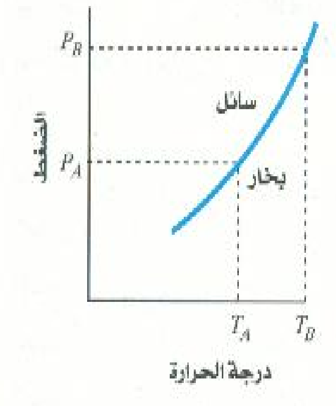
يغلى السائل عندما تتكون الفقاعات البخارية وتنمو داخله . ولكى يمكننا فهم ما يحدث فى هذه العملية يجب أن نفهم أولاً ما هو **ضغط البخار** . لنفرض أن لدينا سائلاً وبخاره فى إناء مغلق كالمبين بالشكل 3-11 . فى مثل هذا الموقف يتحقق الاتزان بين السائل وبخاره عندما يتزن عدد الجزيئات المتبخرة من السائل مع عدد الجزيئات المتكثفة من البخار إلى السائل . ويسمى ضغط بخار السائل فى حالة الاتزان هذه بضغط البخار (أو الضغط البخارى) للسائل . وبالطبع فإن ضغط البخار يزداد بزيادة درجة الحرارة . لماذا ؟



شكل 4-11:
درجة الغليان هى درجة الحرارة التى يتساوى عندها ضغط البخار داخل الفقاعة مع الضغط الخارجى المؤثر على السائل . (حجم الفقاعة مبالغ فى تكبيرة) .

لنفرض الآن أن لدينا كمية من سائل فى إناء مفتوح بحيث يقطع سطحه تحت تأثير الضغط الجوى كما هو مبين بالشكل 4-11 ، ولننظر هذه المرة إلى الجزيئات الموجودة داخل السائل . ونظرًا للحركات العشوائية للجزيئات داخل السائل ، يحدث بين حين وآخر أن تكتسب مجموعة من الجزيئات كمية كافية من الطاقة لفصلها عن بعضها

البعض ، وبذلك يتكون حيز خالٍ ، أو ثقب ، داخل السائل ، وعندئذ تتبخر بعض الجزيئات من السائل إلى الثقب ، ومن ثم يرتفع ضغط البخار داخله . وبمرور الوقت يمكن أن يصل ضغط البخار داخل الثقب إلى قيمة مساوية لضغط البخار عند درجة حرارة السائل . فإذا كانت درجة الحرارة منخفضة سيكون الضغط داخل الثقب صغيرًا مما يؤدى إلى ضموره وفنائه تحت تأثير الضغط الجوى على سطح السائل . أما إذا كانت درجة الحرارة مرتفعة فسوف يكون الضغط داخل الثقب كبيرًا ، ربما أكبر من الضغط داخل السائل نتيجة لتأثير الضغط الجوى . وفي هذه الحالة سوف تتسبب الزيادة في الضغط داخل الثقب ، الذى أصبح الآن فقاعة مليئة بالبخار ، في تمدد الفقاعة . وتحت تأثير قوة الطفو المؤثرة على الفقاعة ، وعلى الكثير من مثيلاتها الأخريات ، سوف ترتفع الفقاعة إلى سطح السائل وتنفجر ، وهي الظاهرة التي نعرفها باسم الغليان . وهكذا نرى أن السائل يصل إلى حالة حرجة عندما تصبح درجة الحرارة عالية بدرجة كافية لكي يتساوى ضغط بخار السائل مع الضغط الجوى فوق سطحه . وعندئذ تتكون الفقاعات المليئة بالبخار وتنمو داخل السائل فيما يعرف بالغليان .



شكل 5-11:
منحنى تبخير نموذجي . يحدث الغليان عند درجة T_A عندما يكون الضغط P_A . وترتفع نقطة الغليان إلى T_B عند زيادة الضغط إلى P_B .

يغلى السائل عند درجة الحرارة التي يتساوى عندها ضغط البخار تمامًا مع الضغط الخارجي على السائل .

وحيث أن ضغط البخار عند درجة 100°C يساوى 101 kPa في حالة الماء ، وبما أن 1 atm = 101 kPa ، فإن الماء يغلى عادة عند درجة 100°C . ولكن الضغط الجوى في المناطق الجبلية العالية يمكن أن يصل إلى 80 kPa نقط ، ولذلك يغلى الماء في مثل هذه المناطق عند حوالى 94°C . هذا ويمثل الجدول 2-11 نقط غليان بعض السوائل المعروفة عند الضغط الجوى المعتاد (P_a = 101 kPa) . وبقياس نقطة غليان المادة عند ضغوط محيطة مختلفة وتمثيل النتائج بيانيًا سوف نحصل على منحنى كالمبين بالشكل 5-11 في حالة الماء ؛ ويعرف الخط الفاصل بين السائل والبخار باسم **منحنى التبخير** . ولإيجاد نقطة غليان السائل عند ضغط معين باستخدام منحنى التبخير ، نرسم خطًا أفقيًا عند هذا الضغط ثم نوجد نقطة تقاطعه مع المنحنى . وبإسقاط عمود من نقطة التقاطع هذه على المحور الأفقي سوف نحصل على درجة الغليان المطلوبة عند الضغط المعنى . ومن الجدير بالذكر أن الغليان مثال لما يسمى **تغير الطور** ، ولذلك يسمى الشكل 5-11 **برسم بيان الطور** . لاحظ من الشكل 5-11 أن درجة غليان الماء ترتفع بارتفاع الضغط عليه .

من المهم أن نفهم تمامًا أنه **عندما تمر عينة من المادة بعملية تغير في الطور فإن الحرارة المضافة إلى المادة أو الملفوظة بواسطتها لا تغير درجة حرارة المادة إلى أن يتغير طور العينة بأكملها إلى الطور الجديد** . فإذا ما أشعل الموقد تحت قدر من الماء المغلى فإن ذلك سوف يسبب غليان الماء بشكل أكثر عنفًا ، **ولكن درجة الحرارة لن**

ترتفع . ذلك أن الحرارة المصاحبة لتغير طور المادة من سائل إلى غاز تتحدد بكتلة العينة وحرارة تبخير المادة تبعًا للمعادلة 2-11 .

11-6 الانصهار وحرارة الانصهار



(أ)



(ب)

تغيران مختلفان للطور : (أ) تحول الماء من الطور الصلب إلى الطور السائل (انصهار) ، (ب) تحول ثانى أكسيد الكربون من الطور الصلب إلى الطور الغازى (تسامى) .

تنصهر بلورات الثلج عند درجة $0°C$ تحت الضغط الجوى القياسى . وقبل الانصهار تكون جزيئات الماء فى الثلج مرتبة فى نسق بلورى ذى ترتيب محكم ، حيث تحفظ الجزيئات فى موضعها بواسطة قوة التجاذب القوية المتبادلة بين الجزيئات . ولصهر البللورة يجب أن تنتزع الجزيئات من هذا الترتيب المحكم بحيث لا يصبح ترتيبها منتظمًا . هذه العملية تحتاج إلى طاقة ، وعادة تزود المادة بهذه الطاقة على هيئة حرارة .

يتضح من ذلك إذن أنه عند تسخين مادة بلورية فإنها تبدأ فى الانصهار عند درجة حرارة معينة . وإذا ما أضيفت الحرارة ببطئ شديد إلى الخليط المكون من المادة البلورية والسائل سوف تظل درجة الحرارة ثابتة إلى أن يتم انصهار جميع البلورات . ولكل مادة نقطة انصهار معينة ، ولكى تنصهر المادة البلورية يجب تزويدها بكمية معين من الحرارة - تسمى **حرارة الانصهار** - عند هذه الدرجة .



كمية الحرارة اللازمة لتغير طور وحدة الكتلة من الطور الصلب إلى الطور السائل تسمى حرارة انصهار المادة (H_f) .

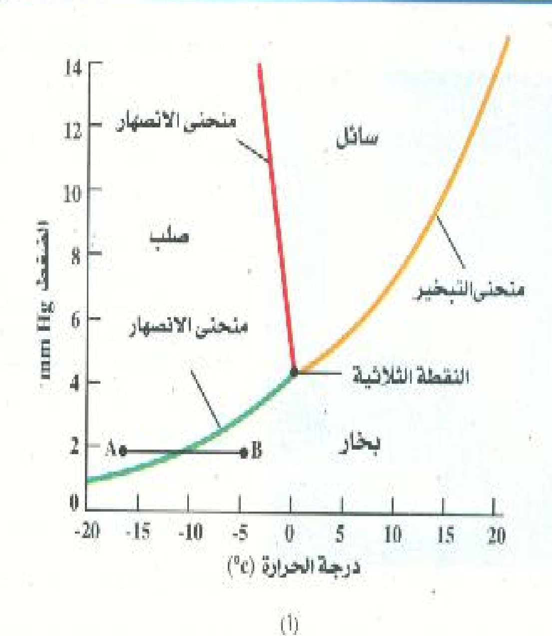
$$Q = mH_f \qquad (11\text{-}3)$$

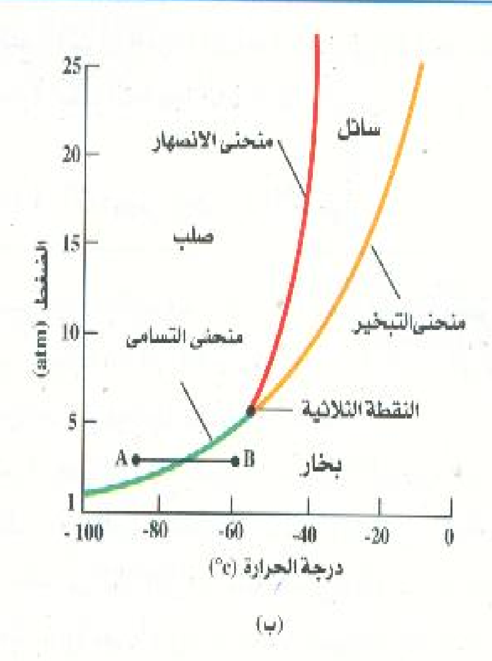
وعندما تتحول وحدة الكتلة من المادة من الطور الصلب إلى الطور السائل سوف تتحرر نفس هذه الكمية من الطاقة من المادة .

وكما فى حالة التبخير فإن الحرارة المضافة إلى المادة أو المفقودة منها أثناء تحولها من الصلابة إلى السيولة أو من السيولة إلى الصلابة لا تغير درجة حرارة المادة إلى أن يتغير طور العينة بأكملها .

وحرارة انصهار الماء تساوى $335\ kJ/kg\ (80\ cal/g)$ ، ويوضح الجدول 2-11 قيم حرارة الانصهار لبعض المواد الأخرى . لاحظ أن حرارة انصهار وحرارة تبخير المواد ذات الرابطة الهيدروجينية ؛ كالماء ، والإيثانول (الكحول الإيثيلى) أكبر من الأخرى . لماذا ؟

يمكن تغيير نقطة تجمد السائل بتطبيق ضغط كبير على النظام . فإذا كانت المادة تنكمش عند تجمدها فإن نقطة الانصهار سوف ترتفع بزيادة الضغط ، وهذا هو سلوك معظم المواد بالفعل . ولكن قليلاً من المواد ، كالماء مثلاً ، يتمدد عند التجمد ، وفى هذه الحالة سوف تؤدى زيادة الضغط إلى انخفاض نقطة تجمد مثل هذه المواد . لذلك فإن ضغط المتزلج على الثلج على نصل حذائه قد يسبب انصهار الثلج تحته . وفى هذه الحالة يكون المتزلج متزلجا فى الحقيقة على الثلج المشحم بغشاء رقيق من الماء . ويمكن ملاحظة هذا السلوك بالاستعانة بما يسمى **منحنى انصهار** المادة ، وهو المنحنى الذى





شكل 6-11:
رسم بيان الطور لكل من (أ) الماء ، (ب) ثانى أكسيد الكربون لاحظ موضع النقطة الثلاثية بالرسم .

يبين كيف تعتمد نقطة الانصهار على الضغط ، ويمثل الشكل 6-11 أمثلة لهذه المنحنيات بالنسبة للماء وثاني أكسيد الكربون . وحيث أن درجة الانصهار تعتمد اعتمادًا طفيفًا على الضغط ، فإن هذه المنحنيات تكون رأسية تقريبًا . ومن الجدير بالملاحظة هنا أن ميل منحنى الانصهار لمعظم المواد ، كثاني أكسيد الكربون مثلاً ، يكون موجبًا . وعلى العكس من ذلك فإن منحنى انصهار الماء يكون ذا ميل صغير سالب . هذا يبين أن زيادة الضغط تسبب انخفاض درجة الانصهار ، مما يعكس حقيقة أن الماء يتمدد عند تجمده .

ويوضح رسم بيان الطور الكامل أيضًا أنه إذا قل الضغط عن قيمة معينة ، فإن المادة يمكن أن تتحول من الطور الصلب إلى الغازى مباشرة دون المرور على الطور السائل إطلاقًا ، وهذه العملية تسمى **التسامى** ، هذا ويتضمن الشكل 6-11 أيضًا منحنى التسامى لكل من الماء وثاني أكسيد الكربون . لاحظ الفرق الكبير فى قيم الضغط على المحورين الرأسيين للمنحنيين .

يوضح الشكل 6-11 كذلك أن لكل مادة نقطة واحدة تتقاطع عندها المنحنيات الثلاثة الفاصلة بين الأطوار المختلفة للمادة . هذه النقطة التى تمثل زوجًا فريدًا من الضغط ودرجة الحرارة ، والذى يختلف من مادة إلى أخرى ، تسمى **النقطة الثلاثية** لتلك المادة . ويمكننا أن نجد من الشكل أن النقطة الثلاثية للماء توجد عند درجة الحرارة 0.01°C والضغط 4.58 torr (0.006 atm) ؛ أما فى حالة ثانى أكسيد الكربون فإن إحداثيى النقطة الثلاثية هما ‎-56.6°C‎ و 5.11 atm .

ويمكننا أن نرى من الشكل 6-11 أن التسامى لا يمكن حدوثه إلا إذا كان الضغط على المادة أقل من الضغط عند النقطة الثلاثية للمادة ، ويمثل الخطان AB مثالين لعمليتى تسامى الماء وثانى أكسيد الكربون . وكلنا يعلم أن ثانى أكسيد الكربون

يتسامى عند الضغط الجوى المعتاد ، وذلك لأن 1 atm أقل كثيرًا من الضغط عند النقطة الثلاثية لهذه المادة . وبناء على ذلك فإن تحول وصول CO_2 إلى الطول السائل يستلزم زيادة الضغط عن 5.11 atm . وفى الختام نقول أن التسامى يرتبط بما يعرف باسم **حرارة التسامى** ، تمامًا كما أن الانصهار والتبخير مرتبطان بحرارتى الانصهار والتبخير السابق مناقشتهما .

مثال توضيحى 11-1

ما هى كمية الحرارة المتحررة من 50 g من الماء (أ) عند تحولها من الطور السائل إلى الطور البلورى عند درجة 0°C ؟ (ب) عند تحولها من بخار إلى سائل عند درجة 100°C ؟

استدلال منطقى :

(أ) عندما تتبلور الكتلة m تتحرر منها كمية قدرها mH_f من الطاقة . إذن :

$$Q = mH_f = (50 \text{ g})(80 \text{ cal/g}) = 4000 \text{ cal} = 16{,}700 \text{ J}$$

(ب) كمية الحرارة المتحررة من كتلة قدرها m من غاز عند تكثفها تساوى mH_v وعليه :

$$Q = mH_v = (50 \text{ g})(539 \text{ cal/g}) = 27{,}000 \text{ cal} = 113{,}000 \text{ J}$$

لاحظ أن التحول الطورى من بخار إلى ماء يحرر كمية أكبر كثيرًا من الحرارة بالمقارنة بالتحول الطورى من ماء إلى ثلج .

تمرين : ما هى كمية الحرارة اللازمة لصهر 500 g من الرصاص عند درجة 327°C .

الإجابة : 4.29×10^5 J .

11-7 قياس كمية الحرارة (الكالوريمترية)

تجرى الكثير من التجارب المتعلقة بالحرارة فى إناء يسمى **المسعر** ، وهو جهاز يعزل المواد عزلاً حراريًا بحيث لا تستطيع الحرارة أن تسرى منها أو إليها من الوسط المحيط . وتعتبر قارورة الترموس العادى مسعرًا جيدًا إلى حد كبير ، إذ لا تتمكن الحرارة من المرور خلال الجدار الزجاجى المزدوج بفضل الطلاء المعدنى اللامع الذى تحمله والفراغ الموجود بين الجدارين . وسوف نرى فى الأجزاء 11-9 إلى 11-11 مدى فاعلية هذا التصميم فى عزل محتويات الترموس عزلاً حراريًا عن الوسط المحيط .

لنفرض أننا وضعنا مادتين أو أكثر ذات درجات حرارة مختلفة سويًا فى المسعر . هذه المواد سوف تتبادل الطاقة الحرارية فيما بينها إلى أن تصل جميعها إلى نفس درجة الحرارة ، أى إلى أن تصل إلى حالة الاتزان الحرارى . وحيث أن الطاقة لا يمكنها الانتقال من أو إلى المواد الموجودة بالمسعر ، فإن قانون بقاء الطاقة يقودنا إلى استنتاج هام

جدًا : إذا اعتبرنا أن كميات الحرارة المكتسبة تغيرات موجبة ، وكميات الحرارة المفقودة تغيرات سالبة ، فإن :

مجموع التبادلات الحرارية داخل المسعر تساوى صفرًا .

ويمكن صياغة هذا المعنى بأسلوب آخر على الصورة : الطاقة الكلية للنظام المعزول داخل المسعر لا تتغير .

وقبل تطبيق هذه الفكرة على مختلف الأمثلة ، لنراجع معًا أنواع التبادلات الحرارية التى قد تقابلنا .

1 ـ إذا تغيرت درجة حرارة كتلة قدرها m من درجة حرارة ابتدائية T_0 إلى درجة حرارة نهائية T_f ، فإن المعادلة 1–11 تخبرنا أن كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة تكون :

$$Q = mc\,(T_f - T_0)$$

حيث c السعة الحرارية النوعية للمادة . تذكر أن هذا ينطبق فقط على مدى درجات الحرارة التى لا يحدث فيها تغير فى طور المادة .

شكل 7–11: عند إضافة الحرارة إلى مادة صلبة ترتفع درجة حرارتها حتى تصل إلى درجة الانصهار T_f . وباستمرار إضافة الحرارة يتغير طور المادة بدون أن يحدث أى تغير فى درجة حرارتها . وبعد أن تتحول المادة كلها إلى سائل تؤدى إضافة الحرارة إلى ارتفاع درجة الحرارة إلى أن تصل المادة إلى نقطة التبخر (الغليان) T_v . بعدئذ تثبت درجة الحرارة إلى أن يتم تبخر المادة كلها . بعد ذلك سوف تسبب الحرارة المضافة ارتفاع درجة حرارة الغاز .

2 ـ عند انصهار كتلة قدرها m من المادة ، تفيد المعادلة 2–11 أن الحرارة المتبادلة تساوى $Q_f = +mH_f$ ، أما فى حالة التبلور فإن الحرارة المتبادلة تكون $Q_f = -mH_f$.

3 ـ عند تبخر كتلة من المادة قدرها m ، توضح المعادلة 3–11 أن الحرارة المتبادلة تكون $Q_v = +mH_v$ ، وعند تكثف هذه المادة فإن التبادل الحرارى يساوى $Q_v = -mH_v$.

ويلخص الشكل 7–11 كميات الحرارة المرتبطة بارتفاع درجة حرارة المادة وتغيراتها الطورية . ويلاحظ هنا أن الحرارة النوعية تختلف باختلاف الطور ؛ فالحرارة النوعية للثلج وبخار الماء ، على سبيل المثال ، مختلفة عن قيمتها فى حالة الماء السائل . وطبقًا لمناقشتنا السابقة ، يلاحظ أيضًا أن الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة المادة أثناء تغير الطور لا تغير درجة حرارة هذه المادة .

مثال 11-2 :

يحتوى فنجان على 200 g من القهوة عند درجة 98°C . ما هى كتلة الثلج M ، ودرجة حرارته 0°C ، اللازم إضافتها لكى تتغير درجة حرارة القهوة إلى 60°C ؟ إهمل أى سريان للحرارة من القهوة إلى الفنجان ؛ أى افترض أن الفنجان مسعر مثالى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى التبادلات الحرارية التى تحدث فى هذا الموقف ؟

الإجابة : سوف تفقد القهوة كمية من الحرارة لأن درجة حرارتها تقل بمقدار 38°C . وبفرض أن القهوة تتكون أساسًا من الماء ، يمكن اعتبار أن حرارتها النوعية $c = 1.0$ cal/g . C° . وبذلك تتوفر لنا كل البيانات اللازمة لحساب كمية الحرارة المفقودة . أما الثلج فإنه سوف يكتسب نفس هذه الكمية من الحرارة . ويتبقى علينا الآن حساب كتلة الثلج .

سؤال : ماذا يحدث عندما يكتسب الثلج هذه الحرارة ؟

الإجابة : أولاً ، سوف يمتص الثلج الحرارة أثناء انصهاره . بعدئذ ، وبعد تحول كل الثلج إلى ماء سائل ، سوف يؤدى امتصاصه للحرارة إلى رفع درجة حرارته (شكل 7-11) .

سؤال : إلى أى درجة حرارة يصل الثلج ؟

الإجابة : يجب أن يصل الماء والقهوة إلى نفس درجة الحرارة حتى يتحقق الاتزان الحرارى . إذن ، درجة الحرارة النهائية للماء والقهوة ، طبقًا للمعطيات ، تساوى 60°C .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى للحرارة الممتصة بواسطة الثلج والماء ؟

الإجابة : الحرارة الممتصة $= Q_{gain} = Mh_f + cM(60°C - 0°C)$

حيث c هى الحرارة النوعية للماء .

الحل والمناقشة : كمية الحرارة المفقودة بواسطة القهوة هى :

$$Q_{lost} = (1.0 \text{ cal/g . C°})(200 \text{ g})(-38 \text{ C°}) = -7600 \text{ cal}$$

وبمساواة هذه الكمية بكمية الحرارة المكتسبة بواسطة الثلج :

$$Q_{gain} = M(80 \text{ cal/g}) + M(1.0 \text{ cal/g . C°})(+60 \text{ C°}) = 7600 \text{ cal}$$

وبحل المعادلة السابقة سنجد أن M تساوى 54.3 g . لاحظ أن الانصهار يستهلك كمية قدرها $(54.3 \text{ g})(80 \text{ cal/g}) = 4344$ cal من الحرارة ؛ بينما تستهلك حرارة قدرها 3256 cal فى رفع درجة حرارة الثلج المنصهر إلى 60°C .

تمرين : أوجد درجة الحرارة النهائية إذا كانت كمية الثلج المضافة 40 g فقط .

الإجابة : 68°C .

مثال 11-3 :

أسقطت قطعة من فلز كتلتها $80.0\ g$ ودرجة حرارتها $100°C$ فى مسعر مثالى يحتوى على $400\ g$ من الزيت عند درجة $18.0°C$. ما هى الحرارة النوعية للفلز c_m ؟ $c = 0.650\ cal/g\ .\ C°$ للزيت .

استدلال منطقى :

سؤال : ما نوع التبادلات الحرارية فى هذه المسألة ؟

الإجابة : سوف يفقد الفلز كمية من الحرارة أثناء تبريده من $100°C$ إلى $23.1°C$. وسوف يكتسب الزيت نفس كمية الحرارة أثناء تغير درجة حرارته من $18.0°C$ إلى نفس درجة الحرارة النهائية وهى $23.1°C$ ، والبيانات المعطاة بالمسألة كافية لحساب هذه الكمية من الحرارة .

سؤال : ما هى المعادلة التى تنطبق على هذا الموقف بالتحديد ؟

الإجابة :

$$(80.0\ g)(c_m)(-76.9\ C°) + (400\ g)(0.650\ cal/g\ .\ C°)(+5.10\ C°) = 0$$

الحل والمناقشة : هذه المعادلة يمكن كتابتها على الصورة :

$$-(6150\ g\ .\ C°)c_m + 1330\ cal = 0$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى c_m نحصل على $c_m = 0.216\ cal/g\ .\ C°$

مثال 11-4 :

يحتوى إناء زجاجى كبير على $500\ g$ من الزئبق عند درجة $20°C$. إذا غمر سخان كهربائى قدرته $70\ W$ فى الزئبق ، فما هو الزمن الذى يستغرقه السخان فى تبخير $30\ g$ من الزئبق ؟ إهمل كتلة السخان وافترض أن القدرة الكهربائية تستهلك كلها فى تسخين الزئبق فقط .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى البيانات اللازم معرفتها لحساب كمية الطاقة اللازمة لتبخير $30\ g$ من الزئبق ؟

الإجابة : يجب معرفة الحرارة النوعية للزئبق ودرجة غليانه والحرارة الكامنة للتبخير .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى لكمية الحرارة اللازمة ؟

الإجابة : يجب أولاً تسخين كمية الزئبق كلها ($500\ g$) إلى درجة الغليان قبل حدوث أى تبخر ، وبعدئذ يجب تزويد الزئبق بالحرارة الكامنة اللازمة لتبخير $30\ g$ منه . إذن :

$$Q = (500\ g)(c)(T_{boil} - 20°C) + (30\ g)H_v$$

سؤال : ما علاقة قدرة السخان ، 70 W ، بالزمن ؟

الإجابة : تذكر أن القدرة = الطاقة / الزمن . وبما أن 1 W = 1 J/s ، وحيث أن كل هذه المعلومات معطاة بالوحدات SI ، يجب أن تكون c أيضًا بالوحدات SI . وبناء على ذلك فإن معادلة الزمن تكون $Q(\text{J}) = (70\ \text{W})t$.

الحل والمناقشة : تحسب Q باستخدام البيانات المعطاة فى الجدولين 1–11 و 2–11 :

$$Q = (0.500\ \text{kg})(140\ \text{J/kg . C°})(357 - 20)\text{C°} + (0.30\ \text{kg})(2.7 \times 10^5\ \text{J/kg})$$
$$= 31{,}000\ \text{J}$$

وعليه ، فإن الزمن المطلوب هو :

$$t = Q / 70\ \text{W} = (31{,}000\ \text{J})/(70\ \text{J/s}) = 450\ \text{s} = 7.5\ \text{min}$$

تمرين : ما الزمن الذى يستغرقه نفس هذا السخان فى تبخير 50 g من ماء درجة حرارته الأصلية 100°C ؟ **الإجابة** : 27 min .

مثال 5-11 :

اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 10 g تسير بسرعة قدرها 100 m/s بقالب من الخشب فاندفنت فيه . ما هو الارتفاع فى درجة حرارة الطلقة بالتقريب نتيجة للتصادم ؟ بفرض أن طاقة الحركة تتحول بأكملها إلى طاقة حرارية فى الطلقة وحدها .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى كمية الحرارة المتولدة أثناء وصول الطلقة إلى السكون ؟

الإجابة : هذه الكمية تساوى KE الابتدائية للطلقة كاملة : $\Delta \text{KE}_{\text{lost}} = Q_{\text{gained}}$

سؤال : ما هى المعادلة التى تربط ارتفاع درجة بطاقة حركة الطلقة ؟

الإجابة : $\frac{1}{2}mv^2 = mc\Delta T$

الحل والمناقشة : باستخدام قيمة c للرصاص ، المعطاة بالجدول 1–11 ، نحصل على :

$$\Delta T = \frac{(1/2)v^2}{c} = \frac{(0.5)(100\ \text{m/s})^2}{1.3 \times 10^2\ \text{J/kg}\cdot\text{°C}}$$
$$= 39\ \text{C°}$$

عليك أن تتحقق من أن الوحدات تختصر مع بعضها البعض كما هو مبين . لاحظ أن ΔT تعتمد على مربع مقدار السرعة .

وعليه ، فإذا كانت درجة الحرارة الأصلية للطلقة 20°C ، فإن درجة حرارتها النهائية ستكون 59°C بالتقريب . وإذا كانت الطلقة متحركة بسرعة مقدارها 600 m/s ، فسوف تتضاعف ΔT بمقدار 36 مرة ، وستصبح درجة حرارتها النهائية عندئذ حوالى

1430°C . وبالطبع ستكون الطلقة قد انصهرت قبل وصولها إلى هذه الدرجة ، وبالتالى لن تكون الحسابات السابقة صحيحة . كيف يمكن إجراء الحسابات فى هذه الحالة ؟

مثال توضيحى 2-11

عندما يقول المتخصصون فى التغذية أن القيمة الغذائية لكل 1 kg من الخبز تساوى 2600 Cal فإن ذلك يعنى أنه إذا حرق الخبز فى الأكسجين النقى فإنه يعطى 2600 kcal من الحرارة لكل كيلو جرام . (يولد الجسم الحرارة من الطعام فى تفاعل كيميائى مشابه إلى حد ما) . قدر كمية الحرارة المنطلقة من الجسم كل يوم .

استدلال منطقى :

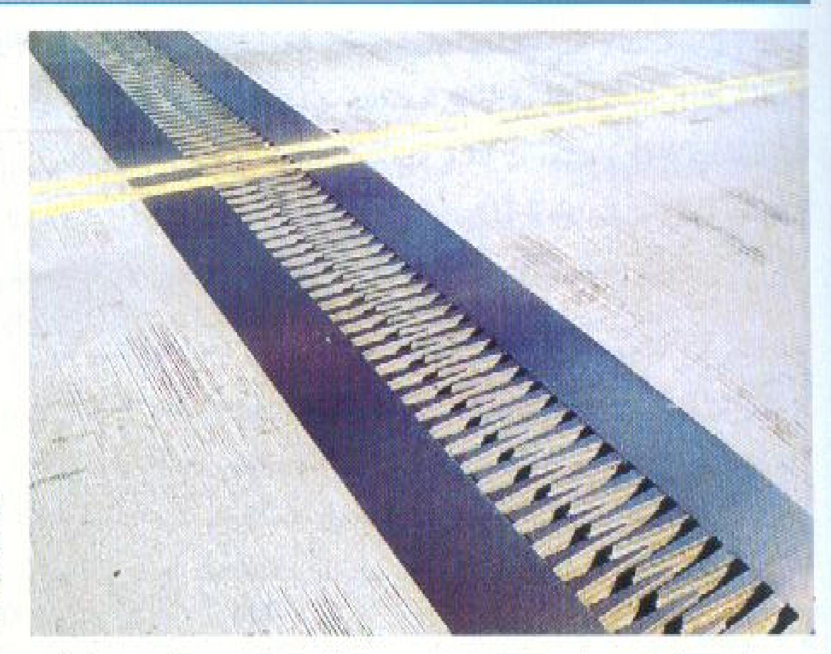
تختلف حاجة الإنسان اليومية من السعرات الغذائية من شخص إلى آخر ، ولكنها تتراوح بين 2000 Cal و 3000 Cal . وحيث أن هذه السعرات هى فى الواقع سعرات كبيرة (كيلو سعرات) ، فإن عملية الأيض (التمثيل الغذائى) تولد داخل الجسم حوالى 2×10^6 cal إلى 3×10^6 cal من الحرارة كل يوم . وحيث أن درجة حرارة الجسم ثابتة تقريبًا ، يجب أن يفقد الجسم يوميًا نفس هذه الكمية من الحرارة المتولدة . ومن المعلوم أن هواء الزفير وتبخر العرق من الجلد آليتان معروفتان لتبريد الجسم ، إلا أن هناك آليات أخرى لا تقل عنهما فى الأهمية .

تمرين : إذا أمكن لفتاة كتلتها 60 kg أن تحبس داخلها كل الطاقة التى تستهلكها يوميًا ، وقدرها 1800 Cal ، فما هو الارتفاع الناتج فى درجة حرارة جسمها . اعتبر أن السعة الحرارية النوعية لجسم الفتاة 0.83 cal/g. C° . **الإجابة** : 36 C° .

11-8 التمدد الحرارى

رأينا أن درجة حرارة المادة مقياس للطاقة الكامنة فى جزيئاتها . وعند رفع درجة حرارة سائل أو جامد تزداد طاقة جزيئاته ، وبالتالى تزداد سعة اهتزازها . ونتيجة لهذه الزيادة فى سعة اهتزاز الجزيئات سوف يزداد متوسط المسافة بين كل جزئ والجزيئات المجاورة . أى أن السائل أو الجامد يتمدد عند رفع درجة حرارته . وبالرغم من وجود بعض الاستثناءات الواضحة من هذه القاعدة فى مدى صغير من درجات الحرارة (فالماء على سبيل المثال ينكمش* عند رفع درجة حرارته من 0°C إلى 4°C) . فإن المواد عمومًا تتمدد بزيادة درجة الحرارة ، بشرط عدم حدوث تغير فى الطور .

* فى حالة الماء، تسبب الرابطة الهيدروجينية تجمع الجزيئات فى مجموعات لكل منها تركيب محدد حتى فوق درجة انصهار الثلج . وبارتفاع درجة الحرارة تتفكك هذه المجموعات مما يؤدى إلى ترتيب أكثر تضامًا للجزيئات .



يجب الفصل بين حواف بلاطات الشوارع الخرسانية باستخدام وصلات تمددية حتى يسمح لها بالتمدد تجاه بعضها البعض دون أن تنبعج عند ارتفاع درجة الحرارة .



سببت درجات الحرارة العالية جدًا تمدد هذه القضبان تمددًا كبيرًا يزيد كثيرًا عن حجم الثغرات التمددية بين المقاطع . ونتيجة لذلك انبعجت القضبان جانبًا مما أدى إلى خروج القطار عن الخط .

من الواضح أن التمدد الحرارى للمعدن فى بناية أو قنطرة يمكن أن يكون أمرًا ذا أهمية عملية كبيرة . فإذا لم يؤخذ التمدد الحرارى فى الاعتبار فإن قضبان السكك الحديدية والطرق الخرسانية السريعة سوف تنبعج تحت تأثير حرارة الشمس فى الصيف . وعليه فإن من الضرورى أن نعرف بدقة كيف تتمدد المادة مع درجة الحرارة .

لنفرض أن درجة حرارة قضيب طوله الابتدائى L_0 قد تغيرت بمقدار ΔT . فإذا كانت ΔL تمثل التغير الناتج فى طول القضيب ، فإن التغير النسبى فى الطول سيكون $\Delta L/L_0$. وقد وجد عمليًا - لمعظم الجوامد - أن التغير النسبى فى الطول يتناسب خطيًا مع تغير درجة الحرارة فى مدى معين من درجات الحرارة . ولوصف التمدد الحرارى فى هذه الحالة يمكننا تعريف **معامل التمدد الحرارى الطولى** α للمادة بالمعادلة :

$$\alpha = \frac{\text{التغير النسبى فى الطول}}{\text{التغير فى درجة الحرارة}} = \frac{\Delta L / L_0}{\Delta T}$$

التى يمكن كتابتها على الصورة :

$$\Delta L = \alpha L_0 \, \Delta T \qquad (11\text{-}4)$$

من الواضح أن وحدات α ، طبقًا للتعريف ، هى وحدات مقلوب درجة الحرارة ، أى $1/°C$ أو $1/K$ ؛ ويمكنك أن تجد القيم النموذجية لمعامل التمدد الطولى α لبعض المواد فى الجدول 3-11 .

وكمثال لاستخدام معامل التمدد الطولى ، لنفرض أن درجة حرارة قضيب من النحاس الأصفر طوله 75 cm قد تغيرت بمقدار +50°C . عندئذ ستكون الزيادة فى طول القضيب (استخرج قيمة α من الجدول 3-11) :

$$\Delta L = \alpha L_0 \, \Delta T = (19 \times 10^{-6} /C°)(0.75 \text{ m})(50 \text{ C°}) = 7.1 \times 10^{-4} \text{ m}$$

جدول 3-11 معامل التمدد الطولى والحجمى لبعض المواد
(لكل درجة سيليزية عند 20°C)

المادة	$\alpha \times 10^6$	$\gamma \times 10^6$
ماس	1.2	3.5
زجاج (مقاوم للحرارة)	~3	~9
زجاج (رخو)	~9	~27
حديد وصلب	12	36
قرميد وخرسانة	~10	~30
نحاس أصفر	19	57
ألنيوم	25	75
زئبق		182
مطاط	~80	~240
جلسرين		500
جازولين (وقود البنزين)		~950
ميثانول (كحول ميثيلى)		1200
بنزين (عطرى)		1240
أسيتون		1490

وحيث أن هذا التغير فى الطول صغير جدًا ، فإن قيمة L_0 المستخدمة لتعيين ΔL ليست حساسة لدرجة الحرارة بدرجة كبيرة كافية لأن نهتم كثيرًا بدرجة الحرارة التى يقاس عندها . ولكن الحقيقة أن α يتغيرا تغيرًا طفيفًا مع درجة الحرارة ، ولذلك يجب استخدام القيمة المناسبة لكل مدى معين من درجات الحرارة فى الحسابات عالية الدقة . ومع ذلك فإن من النادر أن يكون لهذا التعقيد أية أهمية فى التطبيقات العملية .

هناك نظير مفيد للتمدد الحرارى وهو التكبير الفوتوغرافى . ففى كلتا الحالتين نجد أن كل بعد طولى للجسم يعانى نفس التغير النسبى كغيره من الأبعاد ، بما فى ذلك الثقوب الموجودة بالمادة . ويستخلص من ذلك أن محيط الثقب سوف يتغير فى الطول بنفس المقدار سواء كان مليئًا بالمادة أو فارغًا . وعليه فإن الزيادة فى درجة الحرارة تسبب **تمدد** الثقوب ، وليس انكماشها .

يعتبر التمدد الحجمى للمادة ظاهرة هامة أيضًا ، وخاصة فى حالة السوائل . وقياسًا على الطريقة السابق استخدامها فى تعريف معامل التمدد الطولى ، يمكن تعريف **معامل التمدد الحرارى والحجمى** γ بأنه التغير النسبى فى الحجم نتيجة لتغير درجة الحرارة بمقدار يساوى الوحدة :

$$\gamma = \frac{\Delta V / V_0}{\Delta T}$$

ومنه نجد مباشرة أن :

$$\Delta V = \gamma V_0 \Delta T \qquad (11\text{-}5)$$

وبالمثل ، فإن وحدات γ هى وحدات مقلوب درجة الحرارة . وكمثال لتطبيق هذه المعادلة ، افترض أن $100\ cm^3$ من البنزين قد سخنت من درجة $20°C$ إلى $25°C$. إذن ، طبقًا للمعادلة 5-11 ، سنجد أن التغير فى حجم هذه الكمية من البنزين يساوى (استخرج قيمة γ من الجدول 3-11) :

$$\Delta V = (1.24 \times 10^{-3}\ /C°)(100\ cm^3)(5\ C°) = 0.62\ cm^3$$

وهذا التغير فى الحجم يمثل 0.6 فى المائة من الحجم الأصلى ، وهو تغير كبير فى V فى كثير من التطبيقات . من الضرورى إذن تحديد درجة الحرارة المقاس عندها V إذا أريد استخدام قيم γ المدرجة بالجدول 3-11 . لاحظ أن القيم المعطاة تمثل γ عند $T = 20°C$. وبالطبع يمكن حساب ΔV نتيجة للتغيرات الصغيرة فى درجة الحرارة التى لا تبعد كثيرًا عن $20°C$ بدقة كبيرة باستخدام قيمة V المقاسة عند أى درجة حرارة واقعة فى هذا المدى الصغير .

يبين الجدول 3-11 أن معامل التمدد الطولى للجوامد يساوى ثلث معامل التمدد الحجمى تقريبًا ، وهذه قاعدة عامة للجوامد التى تتمدد بنفس القدر فى مختلف الاتجاهات . هذا وسوف يطلب منك فى المسألة 52 إثبات صحة هذه القاعدة باستخدام تعريفى α و γ .

مثال 6-11 :

يراد رصف طريق سريع بالبلاطات الخرسانية المرصوصة جنبًا إلى جنب ، والتى يبلغ طول الواحدة منها $20\ m$. ما هو اتساع الثغرة الواجب تركها بين كل بلاطتين متجاورتين عند درجة $-20°C$ بحيث لا تنبعج هذه البلاطات عندما تصل درجة الحرارة إلى $+50°C$ ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما شرط « عدم الانبعاج » ؟

الإجابة : لا يمكن أن تنبعج البلاطات إلا بعد ملامسها بعضها ببعض . وعليه فإن شرط « عدم الانبعاج » هو تلامس البلاطات بالكاد عند درجة الحرارة الأعلى .

سؤال : ما هى المعادلة الممكن استخدامها لتعيين مقدار تمدد البلاطة فى هذا المدى من درجات الحرارة ؟

الإجابة : $\Delta L = L_0\ \Delta T$ حيث $\Delta T = +70\ C°$.

سؤال : هل ΔL يساوى اتساع الثغر اللازم تركها بين كل بلاطتين متجاورتين ؟

الإجابة : لكى تتلامس بلاطتان متجاورتان يجب أن تتمدد كل منهما بمقدار يساوى **نصف** اتساع الثغرة الفاصلة بينهما . أى أن البلاطة الواحدة يمكنها أن تتمدد نصف اتساع الثغرة **فى كل جانب** ، وهذا يعنى أن مقدار التمدد الكلى للبلاطة يساوى اتساع الثغرة .

الحل والمناقشة : باستخراج قيمة α للخرسانة من الجدول 3-11 وتطبيق المعادلة (4-11) نجد أن :

$$\Delta L = (20\ m)(10 \times 10^{-6}\ /C^{\circ})(+70\ C^{\circ}) = 0.014\ m = 1.4\ cm$$

مثال 7-11 :

ثنيت قطعة من سلك مصنوع من النحاس الأصفر طولها 1.000 m عند درجة 20°C فى صورة دائرة مع ترك ثغرة اتساعها 1 mm بين الطرفين . ماذا يحدث لاتساع الثغرة عندما ترتفع درجة حرارة السلك إلى 73°C ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما مقدار التغير فى الطول نتيجة لهذا الارتفاع فى درجة الحرارة ؟

الإجابة : باستخدام البيانات المعطاة بالجدول 3-11 :

$$\Delta L = (1.000\ m)(19 \times 10^{-6}/C^{\circ})(+53\ C^{\circ}) = 1.0 \times 10^{-3}\ m = 1.0\ mm$$

سؤال : هل يعنى ذلك انغلاق الثغرة التى اتساعها 1 mm ؟

الإجابة : تذكر التماثل مع التكبير الفوتوغرافى الذى يفيدنا بأن اتساع الثغرة يزداد بنفس القدر النسبى (10^{-3}) كأى بعد طولى آخر . وهكذا فإن الزيادة فى اتساع الثغرة تساوى 10^{-3} mm .

سؤال : وبجانب هذا التماثل مع التكبير الفوتوغرافى ، كيف يمكن إثبات أن الثغرة سوف تزداد اتساعًا ؟

الإجابة : المحيط الأصلى للدائرة C يساوى 1.001 m وليس 1.000 m وعليه فإن الزيادة النسبية فى طول المحيط تكون $\Delta C/C_0 = 10^{-3}$ ، أى أن الطول الجديد لمحيط الدائرة هو :

$$C = C_0 + (0.001)C_0 = 1.001\ m + 0.001001\ m = 1.002001\ m$$

وهكذا فإن طول السلك يزداد بمقدار 1 mm ، ولكن محيط الدائرة التى يمثل السلك جزءًا منها يزداد بمقدار أكبر قليلاً من السلك . وقد عبرنا عن النتيجة النهائية بمثل هذا العدد الكبير من الأرقام المعنوية لتوضيح الزيادة فى C .

مثال 8-11 :

ملأ إناء من الزجاج الرخو حجمه 50.0 ml إلى حافته تمامًا بالبنزين عند درجة 0.0°C . هل ينسكب بعض البنزين من الإناء إذا ارتفعت درجة حرارته إلى 30.0°C ؟ وإذا حدث ذلك ، فما حجم الكمية المنسكبة منه ؟

استدلال منطقى :

سؤال : كيف نعرف ما إذا كان بعض البنزين سوف ينسكب من الإناء أم لا ؟

الإجابة : الحجم الابتدائي لكل من الإناء والبنزين فيه متساويان (وهذا معنى « مملوء إلى الحافة ») ، كما أنهما يعانيان نفس التغير في درجة الحرارة ، ومن ثم فإن حجم كل منهما سوف يزداد نتيجة لارتفاع درجة الحرارة . فإذا كان معامل التمدد الحجمى في حالة البنزين أكبر منه فى حال الزجاج الرخو ، فلن يتمكن الإناء من استيعاب كل البنزين فى حجمه الجديد ، وبذلك ينسكب بعض البنزين من الوعاء .

سؤال : أى معاملى التمدد الحجمى أكبر من الآخر ؟

الإجابة : يوضح الجدول 3-11 أن معامل التمدد الحجمى للبنزين أكبر كثيراً من معامل التمدد الحجمى للزجاج الرخو . ومعنى ذلك أن بعض البنزين لابد أن يفيض من الإناء عند درجة الحرارة العالية .

سؤال : ما هى المعادلة اللازم استخدامها لإيجاد حجم البنزين المنسكب ؟

الإجابة : ΔV (للزجاج) ـ ΔV (للبنزين) = الحجم المنسكب

الحل والمناقشة : نحسب أولاً الزيادة فى حجم البنزين والإناء كلاً على حدة :

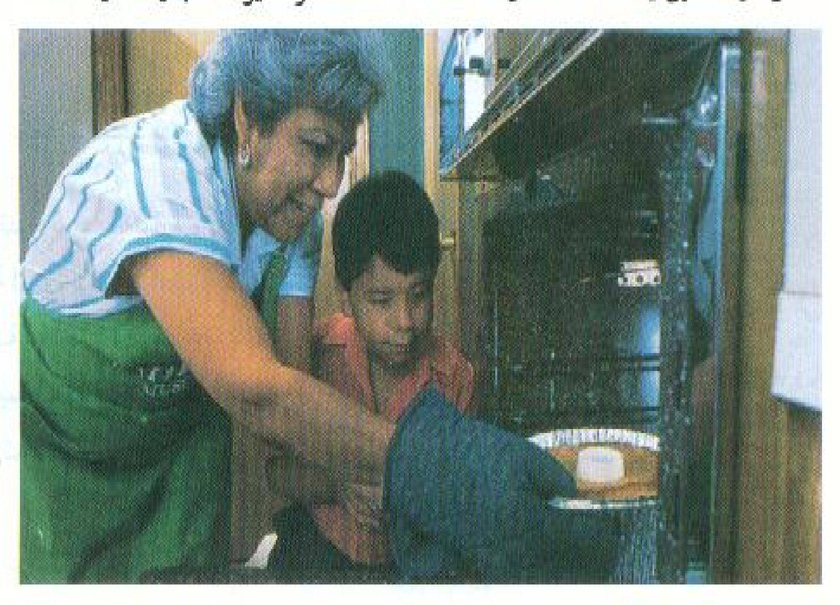
$$\Delta V \text{ (للزجاج)} = (50.0\ \text{ml})(27 \times 10^{-6}/C^\circ)(+30.0\ C^\circ)$$
$$= 0.040\ \text{ml}$$

$$\Delta V \text{ (للبنزين)} = (50.0\ \text{ml})(1240 \times 10^{-6}/C^\circ)(+30.0\ C^\circ)$$
$$= 1.86\ \text{ml}$$

وبالطرح نجد أن حجم البنزين المنسكب يساوى 1.82 ml .

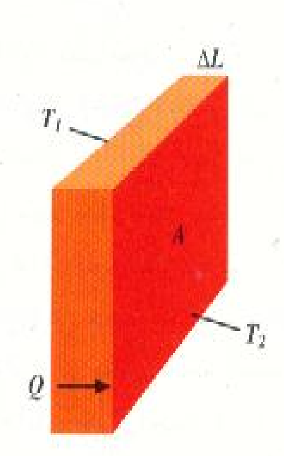
9-11 إنتقال الحرارة : التوصيل

كلنا يعلم أنه إذا أمسك شخص يد ملعقة معدنية مغمورة فى ماء ساخن فإن الحرارة تنتقل من الماء إلى يد ذلك الشخص خلال مادة المعلقة ، وتفسير ذلك بسيط للغاية . ذلك



المواد رديئة التوصيل للحرارة لها تطبيقات عملية كثيرة .

أن الحرارة تدخل الملعقة من الماء الساخن ، ونتيجة لذلك تكتسب ذرات المادة فى الجزء الساخن من الملعقة طاقة حرارية كبيرة . وبزيادة الطاقة الحرارية للذرات تزداد سعة اهتزازتها ، مما يؤدى إلى تصادمها بالذرات المجاورة الأكثر برودة ناقلة إليها الطاقة الحرارية . وهذه بدورها تتصادم مع الذرات التالية فتكسبها طاقة إضافية ، وهكذا ، وبهذه الطريقة تنتقل الطاقة الحرارية من الطرف الساخن للملعقة إلى الطرف البارد ، وفى نهاية الامر تصبح الملعقة كلها ساخنة . هذه الطريقة لانتقال الحرارة 0تسمى **التوصيل الحرارى** .



شكل 8-11:
تنساب الحرارة خلال الشريحة فى الاتجاه المبين لأن $T_1 > T_2$.

فى عملية **التوصيل الحرارى** تنتقل الحرارة خلال المادة بواسطة التصادمات بين الذرات أو الجزيئات المتجاورة .

يحدث التوصيل الحرارى بمعدلات مختلفة فى المواد المختلفة . فالعصا الخشبية يمكن أن يحترق أحد طرفيها ؛ بينما يظل الطرف الآخر باردًا نسبيًا ، ولكن السكين أو الملعقة المعدنية ينقلان الحرارة بسرعة كبيرة من طرف إلى آخر . هذا يوضح أن قدرة المادة تعتمد على تركيبها الذرى فالفلزات على سبيل المثال تحتوى على العديد من الإلكترونات التى يمكنها الحركة بحرية كبيرة خلال المادة ، وبالتالى يمكنها أن تحمل الطاقة الحرارية أثناء حركتها من جزء إلى آخر فى الفلز . ولهذا فإن الفلزات موصلات ممتازة للحرارة .

جدول 11-4 : الموصلية الحرارية* لبعض المواد المعروفة

المادة	k (W/K.m)+
فضة	430
نحاس	400
ألومنيوم	240
نحاس أصفر	105
خرسانة	0.8
زجاج	0.8
قرميد	0.6
ورق أسبستوس	0.2
مطاط	0.2
خشب	0.08
عظم	0.042
العضل	0.042
صوف زجاجي (ألياف زجاجية)	0.04
بلاستيك رغوى	0.03
دهن	0.021

* هذه هى القيم التقريبية لأن k يعتمد إلى حد ما على درجة الحرارة .
+ 1 W/K.m = (1/418.4)(cal/s)/C°/cm = 6.94 Btu.in/h.ft². F°

سوف نستخدم التجربة الموضحة بالشكل 8-11 فى استنتاج العلاقة الرياضية التى تصف التوصيل الحرارى وصفًا كميًا . هذا الشكل يمثل شريحة من المادة سمكها ΔL ومساحة كل من وجهيها A ؛ ولنفرض أن الفرق بين درجتى حرارة هذين الوجهين $T_1 - T_2 = \Delta T$. من الطبيعى أن معدل سريان الحرارة $Q/\Delta t$ خلال الشريحة لابد أن يعتمد على كل من ΔT و A و ΔL . ومن المعقول أن نفترض أن معدل سريان الحرارة يتناسب طرديًا مع كل من ΔT و A (أى يزيد بزيادة ΔT أو A أو كليهما) وعكسيًا مع ΔL (أى يقل بزيادة ΔL) ، وقد تبين أن جميع هذه الافتراضات صحيحة ، إذ ثبت بالتجربة أن :

$$\frac{Q}{\Delta t} = k\frac{A\Delta T}{\Delta L} \qquad (11\text{-}6)$$

حيث تسمى الكمية $\Delta T/\Delta L$ عادة باسم **تدرج درجة الحرارة** ، كما يعرف الثابت k ، الذى يعتمد على مادة الشريحة ، **بالموصلية الحرارية** للمادة . ويمثل الجدول 4-11 القيم النمطية للثابت k لبعض المواد المعروفة عندما يكون $Q/\Delta T$ مقدرًا بالواط و A بالمتر المربع ، ΔL بالمتر ، ΔT بالكلفن . ويمكنك أن تلاحظ من هذا الجدول أن k يكون كبيرًا بالنسبة للموصلات الحرارية الجيدة كالفلزات وصغيرًا فى حالة الموصلات الحرارية الرديئة والتى تعرف **بالعوازل** .

يتحدد إحساس الإنسان بمدى حرارة (أو برودة) جسم ما عند لمسه بالموصلية

الحرارية لهذا الجسم . فالمعدن الساخن مثلا يمكنه أن يحرق يدك بسهولة لأن الحرارة تنساب بسهولة كبيرة منه إلى يدك . أما إذا لمست قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة فإنها لا تحرق يدك بنفس الدرجة من السوء . فنظرًا لأن الموصلية الحرارية للخشب أصغر كثيرًا مما فى حالة المعادن ، فإن الطاقة الحرارية تنساب بسهولة إلى يدك عند نقطة التلامس فقط ، بمعنى أن يدك تبرد الخشب بسرعة عند نقطة التلامس فقط .

هل يمكنك أن تفسر مسترشدًا بنفس هذا المنطق لماذا تبدو الأرضية الباردة المبلطة بالرخام أكثر دفئًا بالنسبة لقدميك العاريتين عندما تقف على سجادة مفروشة فوقها ؟

مثال 9-11 :

مبرد للمشروبات الخفيفة على هيئة صندوق مكعب الشكل أبعاده الداخلية هى $30 \times 30 \times 30$ cm . هذا المبرد مصنوع من مادة بلاستيكية موصلتها الحرارية $k = 0.032$ W/K.m . وضعت كمية من الثلج فى المبرد ، وبعد فترة زمنية صغيرة استقرت درجة الحرارة داخله عند 0°C . ما هى كمية الثلج المنصهر فى الساعة ، إذا كانت درجة الحرارة خارج المبرد 25°C ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما الذى يحدد كمية الثلج المنصهرة ؟

الإجابة : كمية الحرارة التى تنساب إلى داخل المبرد فى الساعة ، علمًا بأن كل 80 cal تسبب انصهار 1.0 g من الثلج .

سؤال : بماذا يتعين معدل انسياب الحرارة إلى داخل المبرد ؟

الإجابة : يتعين هذا المعدل بثلاث كميات :

1 ـ تدرج درجة الحرارة $\Delta T/\Delta L$ بين داخل وخارج المبرد .

2 ـ مساحة جدار المبرد .

3 ـ الموصلية الحرارية للبلاستيك .

سؤال : ما هى معادلة معدل انسياب الحرارة ؟

الإجابة : المعادلة 6-11 تعطينا : $\frac{Q}{\Delta t} = kA\frac{\Delta T}{\Delta L}$

سؤال : ما هى المساحة التى يجب استخدامها ؟

الإجابة : المبرد له ستة جوانب مساحة كل منها $(0.30\text{ m})(0.30\text{ m}) = 0.090\text{ m}^2$ ، وبذلك تكون المساحة الكلية 0.54 m^2 .

الحل والمناقشة : حساب معدل انسياب الحرارة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = (0.032\text{ W/K.m})(0.54\text{ m}^2)(25\text{ K}/0.040\text{ m}) = 11\text{ W}$$

$$= (11\text{ J/s})(1.0\text{ cal}/4.184\text{ J}) = 2.6\text{ cal/s}$$

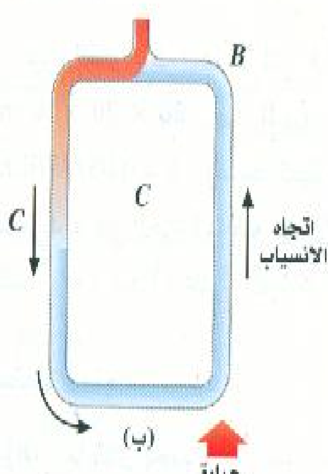
إذن ، فى كل 1 h تنساب إلى داخل المبرد كمية من الحرارة قدرها $9300\ cal = 3600(2.6)$
وهذه تكفى لصهر كمية من الثلج كتلتها :

$$\frac{9300\ cal}{80\ cal/g} = 120\ g$$

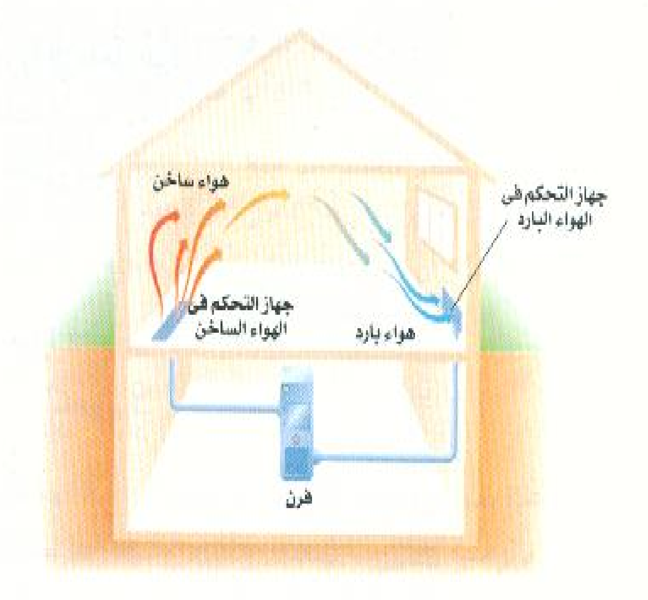
11-10 انتقال الحرارة : الحمل

يمثل الشكل 9-11 تجربة بسيطة توضح ظاهرة الحمل . فإذا ملأنا الأنبوبة الزجاجية المبينة فى الشكل بالماء ، ثم وضعنا قليلاً من الصبغة الملونة قرب رقبتها فإنها تظل ساكنة تقريبًا فى مكانها (الجزء أ) . ولكن عند تسخين الأنبوبة عند أحد الأركان كما هو مبين بالجزء (ب) ، سوف يبدأ السائل فى الانسياب فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة حاملاً الصبغة معه .

والسبب فى هذه الحركة بسيط جدًا . فنظرًا لأن السائل أو الغاز يتمدد بارتفاع درجة حرارته ، فإن الماء الموجود فى الركن السفلى الأيمن عند A سوف يتمدد عند تسخينه ليصبح أقل كثافة من باقى السائل . ولهذا فإن العمود الأيمن من السائل الأقل كثافة لن يستطيع الاستمرار فى حمل العمود الأيسر الأكبر كثافة ولهذا السبب سوف يهبط العمود الأيسر فى الأنبوبة ، وينساب السائل نتيجة لذلك إلى أعلى فى الجانب الأيمن . وتسمى هذه الطريقة لانتقال الحرارة بالحمل .



شكل 9-11:
تبين الصبغة أن السائل يدور فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة عند تسخين السائل فى الموضع A . وفى هذه الحالة تنتقل الحرارة بواسطة السائل أثناء الدوران فى عملية تسمى الحمل .



شكل 10-11 :
فى عملية الحمل يقوم المائع بنقل الحرارة من مكان إلى آخر . والمائع المستخدم فى نظام تدفئة هذا المنزل هو الهواء .

تنتقل الحرارة من مكان إلى آخر فى عملية **الحمل** بواسطة تيارات الموائع .

رأينا فى القسم السابق أن التوصيل لا يتضمن حركة الجزيئات لمسافات كبيرة ، إذ تنتقل الحرارة من جزئ إلى آخر بالتصادم . أما فى الحمل فإن جزيئات المادة الناقلة للحرارة هى التى تتحرك من مكان إلى آخر ناقلة الحرارة معها . والسوائل والغازات

وحدها هى التى يمكنها أن تنقل الحرارة بالحمل لأن جزيئات هذه المواد فقط هـى التى تستطيع أن تتحرك لمسافات كبيرة .

يدفأ الكثير مـن المنازل بواسطة الحمل الـهوائى . والواقع أن الحركة الدورانية للهواء تكون دائمًا محسوسة بدرجة كبيرة حتى فى أنظمة التدفئة التى لا تحتوى علـى مراوح . فمثلاً ، إذا وقف شخص قرب جهاز التحكم فـى خـروج الـهواء الساخن من الفرن الـهوائى فإنه سيلاحظ اندفاع الـهواء الساخن بوضوح من جـهاز التحكـم . ولكى تتم دورة الحمل دون اضطراب ، يجب أن يسمح تصميم أنظمة التدفئة بالحمل الـهوائى للـهواء البارد أن يعود إلى الفرن لتسخينه مرة أخرى ؛ تمامًا كما يعود السـائل فـى دورة الحمل إلى النقطة A فى الشكل 9-11ب ، وهذا هو الغرض من استخدام أجهزة التحكم فى الـهواء البارد فى مثل هذه الأنظمة .

وتنشأ الظواهر الجوية جزئيًا نتيجة لتيارات الحمل الـهوائية ، وتعتبر تيارات الحمـل الـهوائية قرب حواف السلاسل الجبلية ذات أهمية خاصة فى هذا الشأن . ففى أوقـات محددة مختلفة يوميًا تلاحظ تأثيرات كبيرة فى الطقس نتيجة لـهبوط الـهواء البـارد من أعالى الجبال مما يعمل على رفع الـهواء الدافئ فـى السـهولة القريبـة إلى أعلـى ، وهـذا يساعد على تلطيف الجو بدرجة ملحوظة . كذلك فإن تيار الخليج وتيار اليابان يعتـبران مثالين هامين آخرين لانتقال الحرارة بالحمل على نطاق واسـع .



غالبًا ما يكون انتقال الحرارة بالحمل فـى الجو مضطربًا وعنيفًا .

11-11 انتقال الحرارة : الإشعاع

كلنا نعلم أن الشمـس تدفـأ الأرض ، وأنـها فـى الحقيقـة مصدرنـا الأسـاسـى للحـرارة . ويمكننا أن نرى بسهولة أن الحرارة التى تصل إلينا من الشمس لا تنتقل إلينا بـالتوصيل أو الحمل ؛ لأن الفراغ الـهائل بيننا وبين الشمس لا يحتوى على أية جزيئات تقريبًـا .

وبناء على ذلك فإن الانتقال الاهتزازى بالتوصيل أو الانتقال الدورانى بالحمل يصبحان مستحيلين . ومن ثم فإن هذه الحالة هى حالة انتقال للحرارة خلال الفراغ ، أى خلال الفضاء الخالى . هذه الطريقة لانتقال الحرارة تسمى **الإشعاع** .

سوف نرى عند دراستنا للكهرباء والمغناطيسية أن الإشعاع طاقة فى صورة موجات كهرومغناطيسية تنتقل فى الفراغ بسرعة الضوء . هذا وينبعث الإشعاع من جميع الأجسام ، ولكن معظم هذا الإشعاع يكون إشعاعًا **تحت أحمر** عند درجات الحرارة العادية . كذلك فإن الإشعاع دون الأحمر يمتص امتصاصًا شديدًا بواسطة جزيئات الماء ، بما فى ذلك الجزيئات الموجودة فى خلايا الجسم . فمثلاً ، عندما يحس الإنسان بالدفء عند تعرضه للإشعاع دون الأحمر المنبعث من سخان كهربائى ، فإن ذلك يحدث نتيجة لتحول هذا الإشعاع إلى حرارة عند امتصاصه فى الجسم . وبالرغم من أن الإشعاع دون الأحمر يسمى أحيانًا بالإشعاع الحرارى ، فإن من الخطأ اعتبار أن الإشعاع دون الأحمر حرارة إلا بعد تحول الطاقة إلى حرارة فى عملية امتصاص كالسابق الإشارة إليها .

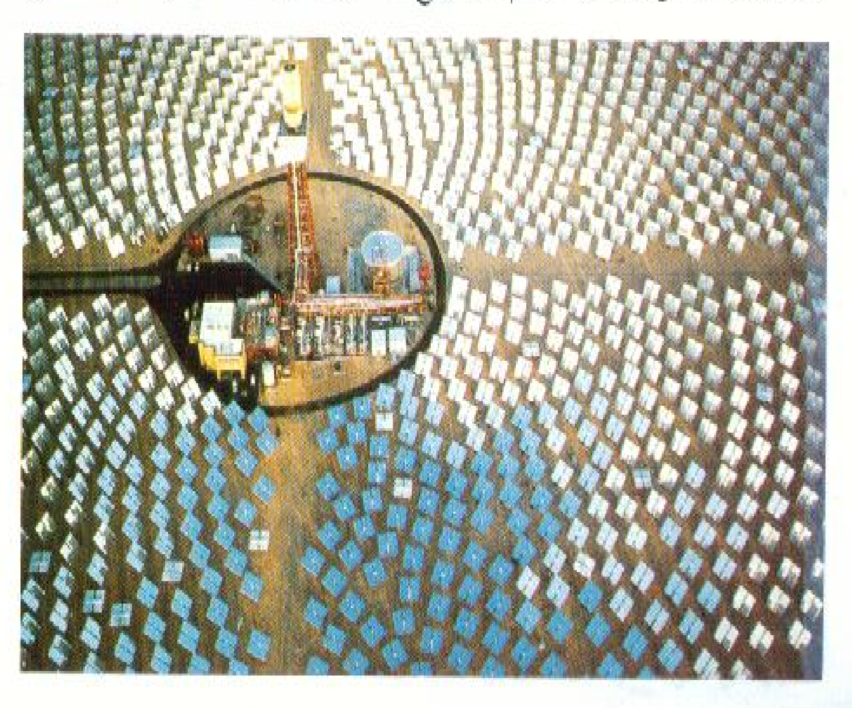
يعتمد معدل إنبعاث الطاقة الإشعاعية من الأجسام اعتمادًا شديدًا على درجة حرارتها ، كما يعتمد أيضًا على مساحة سطح الجسم المشع وطبيعة هذا السطح . هذا ما يلخصه أحد مبادئ الفيزياء المعروف باسم **قانون ستيفان** . وطبقًا لهذا القانون تعطى الطاقة الإشعاعية المنبعثة ، الجسم لكل ثانية بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = e\sigma A T^4 \qquad (11\text{–}7)$$

حيث A المساحة السطحية للجسم ، T درجة حرارته المطلقة . ويعرف الثابت σ **بثابت ستيفان بولتزمان** ، وقيمته العددية كالتالى :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \text{W/m}^2 . \text{K}^4$$

أما المعامل e فيسمى **ابتعاثية** الجسم ، وتتراوح قيمته بين 0 و 1 . هذا وتتوقف قيمة e على



تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية فى محطة الشمس رقم واحد « solar one » فى بارستو ، كاليفورنيا . تركز كل هذه المرايا ضوء الشمس تركيزًا بؤريًا على المجمع المثبت فى قمة البرج حيث تستغل الحرارة المتجمعة فى تسخين بخار الماء إلى درجات حرارة عالية جدًا . وبعدئذ يستخدم هذا البخار فى تشغيل التوربينات المتصلة بالمولدات الكهربائية .

طبيعة السطح المشع ، فإذا كان السطح داكنًا خشنًا فإن ابتعاثيته تكون قريبة من 1 ، بينما تقترب قيمة e من الصفر عندما يكون السطح ناصعًا لامعًا . ففى حالة النحاس المصقول مثلاً فإن e تساوى حوالى 0.3 . وإذا كانت $e = 1.00$ يقال أن الجسم منبعث « مثالى » ، وهذا ما يعرف عادة **بالجسم الأسود** . وكقاعدة عامة يمكن القول أن المبتعثات الجيدة ممتصات جيدة .

هذه النقطة الأخيرة تمكننا من مناقشة صافى امتصاص أو فقد الطاقة الإشعاعية بين جسم والوسط المحيط به ، فإذا وضع جسم فى وسط محيط درجة حرارته T_s فإنه سوف يمتص الطاقة الإشعاعية بمعدل قدره :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{\text{abs}} = e\sigma A T_s^4$$

وإذا كانت درجة حرارة الجسم T ، فإنه سوف يبتعث الطاقة فى نفس الوقت بمعدل قدره :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{\text{emit}} = e\sigma A T^4$$

وعليه ، فإن معدل امتصاص الجسم للطاقة أو فقده لها يساوى الفرق بين $(Q/\Delta t)_{\text{abs}}$ و $(Q/\Delta t)_{\text{emit}}$:

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{\text{net}} = e\sigma A(T^4 - T_s^4)$$

فإذا كانت $T > T_s$ سيكون هناك فقد صاف فى الطاقة وبذلك يبرد الجسم . أما إذا كانت $T < T_s$ سيكون هناك كسب صاف للطاقة وبذلك يسخن الجسم . ومن الطبيعى أن الجسم قد يكتسب أو يفقد الطاقة فى نفس الوقت بالتوصيل أو الحمل أو كليهما معًا .

مثال 11-10 :

درجة حرارة سطح الشمس تساوى 6000 K تقريبًا . احسب القدرة الكلية المشعة من سطح الشمس بفرض أن الشمس كرة نصف قطرها 7×10^8 m ، وأن ابتعاثية الشمس 0.95 .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى الخواص الفيزيائية اللازمة لتعيين القدرة المشعة من أى جسم ؟

الإجابة : مساحة سطح الجسم ودرجة الحرارة والابتعاثية .

سؤال : ما هو المبدأ الأساسى الذى يعطى المعادلة التى تربط بين هذه الكميات ؟

الإجابة : قانون ستيفان ، وهو :

$$\frac{Q}{\Delta t} = P = e\sigma A T^4$$

سؤال : كيف نوجد المساحة السطحية للشمس ؟

الإجابة : فى حالة الكرة ، $A = 4\pi R^2$.

الحل والمناقشة : مساحة سطح الشمس هي :

$$A = 4\pi(7 \times 10^8 \text{ m})^2 = 6 \times 10^{18} \text{ m}^2$$

وعليه فإن القدرة المشعة تكون :

$$P = (5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 . \text{K}^4)(0.93)(6 \times 10^{18} \text{ m}^2)(6000 \text{ K})^4$$
$$= 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

ومن الواضح أن قيمة هذه القدرة هائلة جدًا ، كما هو متوقع . وهذا يرجع إلى كبر حجم الشمس ودرجة حرارتها العالية .

تمرين : أوجد القدرة المشعة لكل متر مربع من سطح الشمس . هذه القيمة واحدة لأى جسم له نفس الابتعاثية عند درجة 6000 K . **الإجابة :** 70 MW/m² .

11-12 العزل الحرارى للمبانى

العزل الحرارى موضوع هام لكل من عليه أن يدفع فواتير تدفئة أو تبريد منزله وبنظرة سريعة إلى الجدول 4–11 يمكننا أن نرى أن المعادن أسوأ العوازل وأن البلاستيك الرغوى من أحسنها . ولهذا يستخدم البلاستيك الرغوى ، وكذلك الصوف الزجاجي (الألياف الزجاجية) ؛ على نطاق واسع فى العزل الحرارى لمعظم المبانى الحديثة . هذه المواد عوازل جيدة جدًا لأنها تحبس الهواء فيها ، والهواء واحد من أفضل العوازل . ونظرًا لأن الهواء في حد ذاته يمكنه أن ينقل الحرارة بالحمل ؛ فإن قيمته الحقيقية كعازل حرارى تتجلى واضحة عند منعه من الحركة حينما يكون محبوسًا فى مواد مسامية كالصوف الزجاجي .



يجب عزل المبانى عزلاً حراريًا جيدًا سواء كان المناخ حارًا أو باردًا لكى يقل التبادل الحرارى بين داخل المبنى وخارجه إلى الحد الأدنى . هذا يساعد على تنظيم درجة الحرارة بالداخل وتوفير استهلاك الوقود اللازم لأجهزة التدفئة أو التبريد .

وفى الأبنية الحديثة تتكون الحوائط عادة من طبقات عديدة متوازية . فإذا افترضنا أن لدينا حائطًا مكونًا من ثلاث طبقات موصلياتها الحرارية k_1 ، k_2 ، k_3 وسُمُوكها L_1 ، L_2 ، L_3 ، فإن معدل انسياب الحرارة خلال هذا الحائط سيكون :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{(L_1 / k_1) + (L_2 / k_2) + (L_3 / k_3)}$$

حيث ΔT الفرق بين درجتي حرارة سطحى الحائط . لاحظ أن عدد الحدود فى مقام الطرف الأيمن يساوى عدد الطبقات فى الحائط . وتعتبر الكميات R_1 / k_1 وأمثالها مقاييس لمقاومة مختلف الطبقات لانسياب الحرارة خلال الطبقة ، ويعرف كل منها بالقيمة R للطبقة المعنية . فإذا كان الحائط مكونًا من N طبقة ، يمكن كتابة المعادلة السابقة بدلالة القيم R على الصورة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R_1 + R_2 + ... + R_N} = \frac{A\Delta T}{R_{tot}} \qquad (11\text{-}8)$$

ويحتوى الجدول 5–11 على القيم R للمواد المستخدمة فى العزل الحرارى للمبانى

بالوحدات SI وأيضًا بالوحدات البريطانية $ft^2 \,.\, °F \,.\, h/Btu$ لأنها تستخدم كثيرًا فى هـذا المجال ؛ حيث $1\ ft^2 \,.\, °F \,.\, h/Btu = 0.176\ m^2 \,.\, K/W$.

ولكى نرى مدى فائدة القيم R ، لنفرض أن لدينا حائطًا مكونًا من ثلاث طبقات مواصفاتها كالتالى : 2.00 cm من الخشب ، 9.0 cm من الصوف الزجاجى ، 1.0 cm من ألواح الجبس . وحيث أن القيمة R الكلية هى مجموعة القيم R لهذه المواد الثلاثة ، سنجد من الجدول 5–11 أن :

$$R_{tot} = 0.185 + 1.95 + 0.06 = 2.20\ m^2 \,.\, K/W$$

جدول 4–11 العامل R بالتقريب لبعض المواد

$R(ft^2.°F.h/Btu)$	$R(m^2.K/W)$	السمك (cm)	المادة
1.05	0.185	2.00	خشب مصمت
0.63	0.111	1.30	خشب أبلكاج
2.1	0.370	1.90	فبر (عازل)
0.34	0.060	1.00	ألواح الجبس
2.0	0.35	.....	سجادة زائد بطانة
0.4	0.070	.....	أسفلت
0.64	0.11	20	أسفلت (مصبوب)
			قالب أسفلتى :
1.1	0.20	20	عادى
2.0	0.35	20	خفيف
3.7	0.65	2.5	صوف زجاجى (ألياف زجاجية)
11	1.95	9.0	
19	3.3	15.0	
1	0.18	.....	شباك (بلوح زجاجى فردى)
2	0.35	.....	شباك (بلوح زجاجى مزدوج)

وباستخدام القيمة R الكلية السابقة فى المعادلة 8–11 يمكن حساب معدل انسياب الحرارة عبر الحائط . لاحظ أن الجزء الأعظم من المقاومة الحرارية للحائط ترجع إلى طبقة الصوف الزجاجى العازلة .

مثال توضيحى 3–11

وجدنا أن القيمة R للحائط السابق تساوى $2.20\ m^2 \,.\, K/W$. فإذا كانت مساحة هذا الحائط $5.0 \times 3.0\ m^2$ ، فما هى كمية الحرارة المفقودة كل ساعة عندما تكون درجة الحرارة بالداخل 20°C وبالخارج -10°C ؟

استدلال منطقى : يعطى معدل فقد الحرارة بالتوصيل كالآتى :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A \Delta T}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{A \Delta T}{R_{tot}}$$

$$= \frac{(15\ m^2)(30\ K)}{(220\ m^2.K/W)} = 200\ W = 200\ J/s$$

وفى الساعة الواحدة تكون : $\Delta t = 3600\ s$ إذن :

$$Q = (200\ J/s)(3600\ s) = 7.2 \times 10^5\ J$$

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الحرارة والطاقة الحرارية ، (ب) الاتزان الحرارى والقانون الصفرى للديناميكا الحرارية ، (جـ) السعر والسعر الكبير والوحدة الحرارية البريطانية ، (د) السعة الحرارية النوعية ،(هـ) حرارة التبخير وحرارة الانصهار ، (و) تغير الطور ، (ز) رسم بيان الطور ، (ح) المسعر ، (ط) معامل التمدد الحرارى ، (ى) التوصيل الحرارى ، (ك) الحمل الحرارى ، (ل) الإشعاع الحرارى ، (م) قانون ستيفان ، (ن) الموصلية الحرارية والعامل R ، (س) النقطة الثلاثية ، (ع) منحنى الانصهار ، (ف) منحنى التبخير ، (ص) منحنى التسامى .

2 ـ شرح كيف يمكننا القانون الصفرى من قياس درجة الحرارة .

3 ـ استخدام المعادلة $Q = mc\Delta T$ لحل المسائل البسيطة فى قياس كمية الحرارة .

4 ـ شرح لماذا يؤدى التبخر إلى تبريد السائل .

5 ـ شرح لماذا تتغير نقطة غليان السائل مع تغير الضغط على السائل .

6 ـ استخدام رسم بيان الطور لتفسير التغيرات الطورية لمادة واعتماد هذه التغيرات الطورية على الضغط ودرجة الحرارة .

7 ـ وصف كيفية تغير درجة حرارة مادة بلورية عند تسخينها ببطء وانصهارها ثم تسخينها أكثر من ذلك ثم تبخرها .

8 ـ حل المسائل المتعلقة بحرارتى الانصهار والتبخير فى الكالوريمترية . وشرح لماذا يعتبر قانون بقاء الطاقة المبدأ الأساسى للحل .

9 ـ استخدام معاملى التمدد الحرارى فى المواقف البسيطة .

10 ـ تعيين كمية الحرارة المنسابة خلال شريحة من مادة بمعلومية درجتى حرارة سطحى الشريحة .

11 ـ تعيين معدل إشعاع الطاقة من جسم ما .

12 ـ إيجاد العامل R لتعيين معدل انسياب الحرارة خلال حائط مكون من عدة طبقات .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

المكافئ الميكانيكى للحرارة

1 calorie = 4.184 J

ثابت ستيفان ـ بولتزمان

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ w/M^2\ .\ K^4$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

الحرارة :

هى الطاقة التى تنتقل من جسم ساخن إلى آخر بارد نتيجة للفرق بين درجتى حرارتهما .

الاتزان الحرارى :

يقال لجسمين أنهما في حالة اتزان حرارى إذا تساوت درجتا حرارتهما . عندما يتلامس جسمان فى حالة اتزان حرارى لا يحدث أى تبادل حرارى بينهما .

القانون الصفرى للديناميكا الحرارية :

إذا اتزن جسمان كل على حدة اتزانًا حراريًا مع جسم ثالث فإنهما يكونان فى حالة اتزان حرارى أحدهما مع الآخر .

الطاقة الحرارية :

الطاقة الحرارية هى الطاقة المرتبطة بالحركات العشوائية لجزيئات وذرات المادة .

السعة الحرارية النوعية (c) :

السعة الحرارية النوعية لمادة تربط كمية الحرارة التى تكتسبها المادة أو تفقدها بالتغير الناتج فى درجة الحرارة .

$$Q = mc\Delta T$$

حرارة التبخير وحرارة الانصهار :

حرارة التبخير (H_v) هى كمية الحرارة اللازمة لتغيير طور وحدة الكتلة من المادة من سائل إلى غاز .

$$Q = mH_v$$

حرارة الانصهار (H_f) هى كمية الحرارة اللازمة لتغيير طور ووحدة الكتلة من المادة من جامد إلى سائل

$$Q = mH_f$$

رسم بيان الطور :

رسم بيان الطور لمادة هو منحنى الضغط مقابل درجة الحرارة الذى يوضح قيم P و T التى تحدث عندها التغيرات الطورية للمادة . وفى هذا الرسم البيانى يفصل منحنى الانصهار بين الطورين السائل والصلب ، ويفصل منحنى التبخير بين الطورين السائل والغازى ، وأخيرًا يفصل منحنى التسامى بين الطورين الصلب والغازى .

النقطة الثلاثية :

النقطة الثلاثية لمادة هى قيمة الضغط ودرجة الحرارة التى تتواجد فيها الأطوار الثلاثة للمادة جميعًا فى حالة اتزان ، وهى نقطة تقاطع منحنيات الانصهار والتبخير والتسامى فى رسم بيان الطور .

معاملا التمدد الحرارى :

معامل التمدد الحرارى الطولى (α) هو النسبة بين التغير النسبى فى طول الجسم وفرق درجة الحرارة الذى يسبب هذا التغير .

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha\,\Delta T$$

معامل التمدد الحرارى الحجمى (γ) هو نسبة التغير النسبى فى حجم الجسم إلى فرق درجة الحرارة الذى يسبب هذا التغير .

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \gamma\Delta T$$

خلاصة :

1 ـ عند ثبوت ΔT ، يعانى كل بعد طولى أو عنصر حجمى من الجسم من نفس التغير النسبى ، تمامًا كما فى حالة التكبير الفوتوغرافى . هذا ينطبق أيضًا على الثقوب والفجوات الموجودة فى الجسم سواء بسواء .

انتقال الحرارة بالتوصيل :

معدل توصيل الحرارة خلال شريحة من المادة سمكها ΔL وساحتها السطحية A يعطى بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = kA\frac{\Delta T}{\Delta L}$$

حيث ΔT فرق درجة الحرارة بين وجهى الشريحة ، k الموصلية الحرارية لمادة الشريحة .

خلاصة :

1 ـ النسبة $\Delta T/\Delta L$ تعرف بتدرج درجة الحرارة عبر الشريحة .

2 ـ الطريقة البديلة لوصف التوصيل الحرارى تتضمن تعريف العامل R للمادة :

$$R = \frac{\Delta L}{k}$$

إذن :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R}$$

وتتضح ميزة استخدام العامل R عندما يتكون حائط من عدة طبقات من مواد ذات سُمُوك مختلفة . ويعطى معدل انسياب الحرارة خلال حائط طبقى بالعلاقة :

$$\frac{Q}{\Delta t} = \frac{A\Delta T}{R_{\text{tot}}}$$

حيث R_{tot} مجموع العوامل R للشرائح المختلفة المكونة للحائط .

انتقال الحرارة بالإشعاع :

يعتمد معدل فقد الجسم للطاقة الحرارية بالإشعاع على درجة الحرارة المطلقة للجسم ومساحة وطبيعة سطح الجسم :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{\text{rad}} = e\sigma AT^4$$

حيث e ابتعاثية السطح ، σ ثابت ستيفان ـ بولتزمان .

خلاصة :

1 ـ الابتعاثية عدد لا بعدى يتراوح من 0 إلى 1 ، ويعتمد على طبيعة سطح الجسم . وتكون الابتعاثية صغيرة فى حالة الأسطح المصقولة ذات العاكسية العالية ، وكبيرة فى حالة الأسطح الداكنة الخشنة .

2 ـ المبتعثات الجيدة (e قريبة من 1) ممتصات جيدة للإشعاع ، وابتعاثيتها تساوى امتصاصيتها . يعطى معدل امتصاص الجسم للطاقة الإشعاعية عند وجوده فى بيئة درجة حرارتها T_s بالعلاقة :

$$\left(\frac{Q}{\Delta t}\right)_{\text{abs}} = e\sigma AT_s^4$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ لديك عينة من غاز الأكسجين O_2 كتلتها 10 g وأخرى من غاز الأرجون Ar كتلتها 10 g . أى هاتين العينيتين أكبر فى السعة الحرارية النوعية ؟

2 ـ أعطى طالب إبريق ترموس يحتوى على مادة مجهولة درجة حرارتها T_1 . وبعد إضافة كمية من الماء الساخن درجة حرارتها T_2 (حيث $T_2 > T_1$) لم تتغير درجة الحرارة داخل الإبريق بل ظلت ثابتة عند T_1 ، فاستنتج الطالب أن السعة الحرارية النوعية للمادة المجهولة تساوى ما لانهاية . اشرح لماذا تشير هذه التجربة إلى أن $c = \infty$. ما هو التفسير المحتمل لهذه النتائج العملية .

3 ـ هل يمكن أن تضاف الحرارة إلى شيء بدون أن تتغير درجة حرارته ؟ ماذا لو كان هذا « الشيء » غازًا ؟ سائلاً ؟ جامدًا ؟

4 ـ ينصهر نوع معين من الشمع عند درجة 60°C . صف تجربة يمكنك استخدامها لتعيين حرارة انصهاره .

5 ـ من الممكن أن تجعل الماء يغلى بشدة بتبريد زجاجة من الماء تم سدها عندما كان الماء يغلى عند درجة 100°C . اشرح .

6 ـ لماذا يبدو لنا أن قطعة من المعدن أبرد من قطعة من الخشب عند نفس درجة الحرارة ؟

7 ـ عندما يتوقع المزارعون أن درجات الحرارة ستكون أقل قليلاً من درجة التجمد فإنهم يقومون أحيانًا بحماية فواكههم وخضرواتهم بتنديتها بالماء . ما هو المبدأ الفيزيائي وراء هذا الإجراء ؟

8 ـ لماذا يكون الحرق الذى يسببه بخار الماء عند درجة 100°C أشد كثيرًا عادة من الحرق الناتج عن الماء عند درجة 100°C ؟

9 ـ تكون التقلبات فى درجة الحرارة فى الأراضى القريبة من المسطحات المائية الواسعة أقل بدرجة ملحوظة منها فى مراكز المناطق الأرضية الواسعة . اشرح .

10 ـ من المعروف أن الغرفة المكتظة بالناس تصبح حارة جدًا إذا لم يجر تهويتها بطريقة مناسبة . بفرض أن كل شخص يطلق من الحرارة كمية تكافئ السعرات الغذائية التى يحرقها خلال اليوم ، قدر الارتفاع فى درجة حرارة فصلك خلال 1 h إذا لم يكن هناك أى فقد للطاقة خارج الفصل .

11 ـ ما هى كمية الماء بالتقريب التى يجب أن تتبخر من سطح جلد رجل متوسط الحجم لكى يبرد جسمه بمقدار 1°C ؟ إلى أى مدى تتفق هذه النتيجة مع ما سمعته عن تأثير العرق على الجسم ؟ ($c_{body} = 0.83$ cal/g.°C) .

12 ـ إذا تعرض الثلج لضغط كبير فإن نقطة انصهاره تنخفض إلى ما دون 0°C ، ويمكننا أن نقول أن نقطة الانصهار تنخفض بمقدار 5°C تقريبًا لكل زيادة فى الضغط المطلق قدرها 6.0×10^7 Pa . قدر نقطة انصهار الثلج تحت مزلجة المتزلج على الثلج .

13 ـ قدر درجة حرارة سطح الشمس باستخدام الحقائق الآتية : القدرة الإشعاعية التى تصل من الشمس إلى الأرض لكل متر مربع تساوى 1340 J/m^2 ، نصف قطر الشمس 7×10^8 m ، بعد الشمس عن الأرض 1.5×10^{11} m .

مسائل

القسم 4-11

1 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب إضافتها إلى 475 g من الماء لكى ترتفع درجة حرارته من 5°C إلى 30°C ؟

2 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب انتزاعها من 1.65 g من الماء لتبريده من 73°C إلى 18°C ؟

3 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) التى يجب انتزاعها من 135 g من النحاس لكى تتغير درجة حرارته من 150°C إلى -25°C ؟

4 ـ ما هى كمية الحرارة (بالسعر والجول) اللازمة لرفع درجة حرارة 2.80 kg من الألمنيوم من 29°C إلى 122°C ؟

الأقسام من 5-11 إلى 7-11

5 ـ ما هى كمية الحرارة المنطلقة من 25 g من بخار الإيثانول (الكحول الإيثيلى) عند تكثفها عند درجة 78°C ثم تبريدها إلى 15°C ؟

6 ـ ما هى كمية الحرارة اللازمة لتسخين 1.35 kg من الزئبق من درجة -12°C إلى 357°C ثم تبخيرها ؟

■ 7 ـ ما هى كمية الحرارة التى يجب انتزاعها من 275 g من بخار الماء عند درجة 100°C لكى تتكثف ثم تنخفض درجة حرارته لتصبح ثلجًا درجة حرارته النهائية -35°C ؟ افترض أن ضغط بخار الماء 1 atm .

8 ـ ما هي كمية الحرارة اللازم إضافتها إلى 240 g من الألمنيوم لتحويلها من الحالة الصلبة عند درجة 27°C إلى الحالة السائلة عند درجة 660°C ؟

■ 9 ـ أسقط قالب من الثلج كتلته 26 g ودرجة حرارته −10°C في فنجان من البلاستيك يحتوى على 375 g من الماء عند درجة 37°C . ما هي درجة الحرارة النهائية للخليط ؟ إهمل أى تبادل حرارى مع الفنجان .

■ 10 ـ صبت كمية من الرصاص المصهور كتلتها 45 g ودرجة حرارتها 327°C فى حفرة فى قالب من الثلج درجة حرارته 0°C . ما هى كمية الثلج المنصهرة عندما يصل الرصاص إلى حالة اتزان حرارى مع قالب الثلج ؟

■ 11 ـ أسقطت كمية من الزئبق الصلب كتلتها 36 g ودرجة حرارتها −39°C في إناء كبيرة يحتوى على خليط من الماء والثلج عند درجة 0°C، فكانت درجة الحرارة النهائية عند الاتزان الحرارى هى 0°C أيضًا . ما هى كمية الثلج الإضافية الناتجة عن إضافة الزئبق ؟

■ 12 ـ ما هى كمية العرق التى يجب أن تتبخر من سطح جلد طفل رضيع كتلته 4.5 kg حتى تنخفض درجة حرارة جسمه بمقدار 2.2 C° ؟ حرارة تبخير الماء عند درجة حرارة الجسم 580 cal/g .

■ 13 ـ متوسط قدرة الإشعاع الشمسى الساقط على الغلاف الجوى للأرض لكل سنتيمتر مربع تساوى 0.138 W/cm² تقريبًا ، ومن المعلوم أن الجزء الأعظم من هذه القدرة يمتص فى الغلاف الجوى قبل الوصول إلى سطح الأرض . لنفرض أن 0.09 فى المائة من القدرة الأصلية يتم امتصاصه بواسطة سطح بحيرة ، ما هى كتلة الماء المتبخر لكل مليمتر مربع من سطح البحيرة في الساعة ؟ استخدم نفس قيمة حرارة التبخير المعطاة فى المسألة 12 .

■ 14 ـ لنفرض أننا أسقطنا 225 g من رصاص درجة حرارته 120°C فى فنجان من الألنيوم كتلته 30 g ودرجة حرارته 25°C يحتوى على 75 g من الماء عند نفس درجة الحرارة . ما هى درجة الحرارة عند الاتزان ؟

■ 15 ـ أضيفت كمية كافية من ثلج درجة حرارته −15°C إلى 90 g من الماء الموجود فى فنجان من النحاس كتلته 40 g عندما كانت درجة حرارتهما الابتدائية 40°C . إذا كانت درجة الحرارة النهائية عند اتزان النظام 20°C ، فما هى كمية الثلج المضافة ؟

■ 16 ـ تحتوى علبة من الصفيح كتلتها 60 g على 45.0 g من الماء و 15.0 g من الثلج فى حالة اتزان حرارى عند 0°C . وعندما أضيفت كمية من الرصاص الساخن كتلتها 275 g ببطء إلى خليط الماء والثلج وجد أن درجة الحرارة النهائية للعلبة ومحتوياتها 14°C . ما هى درجة الحرارة الأصلية للرصاص ؟

17 ـ بفرض أن حرارة تبخير الماء تستهلك كلها فى فصل 1 g من جزيئات الماء عن بعضها البعض عند نقطة الغليان ، ما نصيب الجزئ الواحد من هذه الطاقة ؟ قارن هذه الكمية من الطاقة بقيمة kT عند درجة الغليان .

18 ـ من أى ارتفاع يجب أن تسقط طلقة من الرصاص كتلتها 1 g ودرجة حرارتها 250°C بحيث تنصهر عند اصطدامها بالشارع ؟ افترض أن كل الطاقة الميكانيكية للطلقة يتم امتصاصها كحرارة بواسطة الطلقة وحدها .

19 ـ استخدم سخان كهربائى قدرته 2500 W فى تسخين الماء فى خزان . ما هو الزمن اللازم لتسخين 250 kg من الماء من درجة 15°C إلى 70°C ؟ افترض أن الخزان معزول عن الوسط المحيط تمامًا .

■ 20 ـ سخان مياه منزلى يدخل الماء البارد فى خزانه عند درجة 18.0°C ويخرج منه عند درجة 75°C ، ومعدل سحب الماء الساخن من الخزان 400 cm³/min . بفرض أن معدل سحب الماء الساخن ثابت عند هذه القيمة ، ما هى قدرة السخان الكهربائى المستخدم لتسخين الماء ؟ افترض أن الخزان معزول عزلاً حراريًا مثاليًا عن الوسط المحيط .

■ 21 ـ تستهلك امرأة كتلتها 60 kg كمية قدرها 2500 kcal من الطاقة الغذائية يوميًا . فإذا كان متوسط معدل فقد الطاقة من المرأة إلى الوسط المحيط خلال الأربع وعشرين ساعة 110 W ، فما هى الكمية الباقية من الطاقة الغذائية والتى يمكنها

استهلاكها فى تمارين رياضية ؟ وإذا كان التمرين الرياضى الذى تود المرأة استهلاك هذه الطاقة فيه هو صعود السلالم ، فما هو الارتفاع الذى يجب أن تصعده ؟

■ 22 - تزحلقت فتاة كتلتها 50 kg على قدميها فى مباراة لكرة السلة بينما كانت تجرى بسرعة مقدارها 4.8 m/s واستمرت متزنة أثناء التزحلق إلى أن توقفت تمامًا . ما هى كمية الحرارة المتولدة خلال فترة التزحلق ؟ افترض أن كل هذه الحرارة قد تم امتصاصها فى جزء من لحم الفتاة مساحته $20\ cm^2$ وسمكه 1.0 mm . ما مقدار الارتفاع فى درجة حرارة هذا الجزء ؟ افترض أن c = 0.83 cal/g و $\rho = 950\ kg/m^3$ للحم الإنسان .

■■ 23 - يحتوى فنجان من النحاس كتلته 50 g معزول عن الوسط المحيط على 125 g من الماء عند درجة 20.5°C . وضع خليط من برادة النحاس الأصفر والذهب كتلته 310 g ودرجة حرارته 145°C فى الماء ، فوجد أن درجة الحرارة عند الاتزان 42.3°C . ما هى نسبة برادة الذهب فى الخليط ؟ اعتبر أن c = 0.031 cal/g . C° للذهب ، c = 0.090 cal/g . C° للنحاس الأصفر .

■ 24 - جمعت المجسات الفضائية البيانات الآتية عن كوكبى المريخ والزهرة : (أ) درجة حرارة سطح الزهرة بالتقريب 458°C ، (ب) الضغط الجوى على سطح المريخ 0.006 قدر الضغط الجوى القياسى على سطح الأرض تقريبًا . باستخدام هذه المعلومات وكذلك رسم بيان الطور للماء (شكل 6-11) ، ماذا تستنتج عن حالة الماء على هذين الكوكبين ؟

القسم 8-11

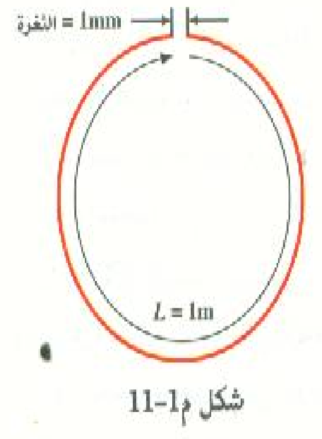
25 - سخنت مسطرة مترية من الألمنيوم من درجة 10°C إلى 45°C . ما هو التغير النسبى فى طولها ؟

26 - كرة من النحاس الأصفر نصف قطرها 3.5500 cm عند درجة -12°C ما هو نصف قطرها عند درجة 55°C ؟

27 - تستخدم قضبان من الصلب طول كل منها 12.5 m عند درجة $T = -30°C$ فى إنشاء خطوط السكك الحديدية . وفى مشروع من هذا النوع رصت القضبان طرفًا على طرف فى خط مستقيم بحيث كانت المسافة بين نهايتى كل قضيبين متتاليين كافية لتماسهما بالكاد عند درجة 45°C . ذلك أنه إذا لم تترك مثل هذه الثغرات فإن القضبان سوف تنبعج عند ارتفاع درجة الحرارة . ما هو اتساع كل من هذه الثغرات ؟

■■ 28 - أعطيت شريطين لقياس الطول أحدهما مصنوع من الصلب والآخر من الألمنيوم ، وكل منهما مدرج للقياس الصحيح (إلى أربعة أرقام معنوية) عند درجة 20°C . وعند قياس طول ماسورة عند درجة -15°C وجد أن قراءة الشريط المصنوع من الصلب 2.630 m . ماذا ستكون قراءة شريط القياس المصنوع من الألمنيوم ؟ ما هو الطول الحقيقى للماسورة (عند -15°C) لأربعة أرقام معنوية ؟

29 - ثنى سلك من النحاس طوله 1 m عند درجة 110°C على شكل دائرة مع ترك ثغرة فاصلة بين نهايتيه طولها 1 mm (شكل م1-11) . ماذا يحدث للثغرة عند تسخين السلك ؟ هل تختفى الثغرة عند درجة حرارة ما ؟



شكل م1-11

30 - من المعتاد استخدام طريقة توافق الانكماش فى الورش الميكانيكية لتركيب القضبان الأسطوانية فى ثقوب بالعجلات والقوالب والألواح المعدنية لنفرض أننا نريد تركيب قضيب قطره 2.0125 cm فى ثقب بقالب من النحاس الأصفر قطره 1.9975 . (هذه الأبعاد مقاسة عند درجة 20°C) . إلى أى درجة حرارة يجب تسخين القالب حتى يمكن تركيب (حشر) القضيب (بدون تسخينه) فى الثقب ؟

31 - قارورة من الزجاج المقاوم للحرارة تم معايرتها بحيث تستوعب $100.0\ cm^3$ تمامًا من سائل عند درجة 20°C . ما هو

الحجم الإضافي من السائل الذى تحمله القارورة عند درجة 50°C ؟ **تلميح** : تذكـر أن القارورة المجوفـة تتمـدد كما لـو كانت مصمتة تمامًا .

■ 32 ـ افترض أن لديك إناء مـن الصلب سعته $500\ cm^3$ عند درجة −10.0°C وبداخله كرة من النحاس الأصفر نصف قطرها 3.50 cm . ملأ الإناء بعد ذلك إلى حافته بالميثانول (الكحول الميثيلى) . فإذا ترك الإناء بمحتوياته حتى وصلـت درجـة حرارته إلى درجة الغرفة وقدرها 27.0°C ، فما هى كمية الميثانول المنسكبة من الإناء ؟ (حجم الكرة هو $V = \frac{4}{3}\pi R^3$) .

■ 33 ـ سلكان أحدهما من الصلب والآخر من النحاس الصفر يستطيلان بنفس القدار عندما تتغير درجتا حرارتهما بنفس المقـدار . ما هى النسبة بين طولى السلكين ؟

القسم 11-9

34 ـ لوح من الخشب الرقائقى (الأبلكاج) ($k = 0.083$ W/K . m) أبعاده السطحية 1.3 m × 2.7 m وسمكه 2.1 cm . مـا هـى كمية الحرارة المنسابة بين وجهيه خلال 1 h إذا كانت درجة حرارتهما −10°C و 27°C ؟

35 ـ ما هى كمية الحرارة المنسابة خلال حائط من الخرسانة مساحته $15\ m^2$ وسمكه 30 cm فى 1 h إذا كانت درجة الحـرارة 0.0°C على أحد جانبيه 22.3°C على الجانب الآخر ؟

■ 36 ـ أثبتت دراسات الحفر العميق للأرض أن درجة الحرارة تزداد بحوالى 1°C لكل 30 m . إذا فرضنا أن $k = 1.5$ W/K . m للقشرة الأرضية ، فما هى كمية الحرارة المنسابة إلى الخارج فى الثانية لكل متر مربع من القشرة الأرضية ؟

■ 37 ـ تستخدم ماسورة من النحاس الأصفر قطرها الداخلى 7.5 cm وسمك جدارها 0.20 فى نقل بخار ماء درجة حرارته 120°C فى أحد المصانع . فإذا كانت درجة حرارة الـهواء المحيط 27°C ، فما معدل فقد الحرارة لكل متر من طول الماسورة ؟

■ 38 ـ صندوق للتبريد الثلجى ، من النوع المستعمل فى حفظ المأكولات والمشروبات المثلجة فى الرحلات الخلوية ، مصنوع مـن البلاستيك الرغوى وأبعاده الخارجية 45 cm × 35 cm × 30 cm ، وسمك جدرانه 3.75 cm . فإذا أريـد أن تظل درجـة الحرارة داخل الصندوق ثابتة عند 0°C عندما تكون درجة الحرارة الخارجية 30°C ، فما هى كمية الثلج المنصهرة داخل الصندوق فى كل ساعة ؟

القسم 11-11

39 ـ سخنت كرة معدنية نصف قطرها 1.8 cm ، وابتعاثيتها 0.55 إلى درجة 550°C ثم علقت فى سلك دقيق فى غرفة درجـة حرارتها 25°C . (أ) بأى معدل تشع هذه الكرة الطاقة فى البداية ، بفرض أن امتصاصـها للطاقـة مـن الغرفـة مـهمل ؟ (ب) ما هو صافى معدل فقد الطاقة الابتدائى بواسطة الكرة ؟

■ 40 ـ فتيلة من سلك التنجستين الساخن نصف قطرها 0.060 cm ودرجة حرارتها 3000 K وابتعاثيتها 0.74 . احسب معدل انبعاث الطاقة لكل 1 m من طول السلك . إهمل الإشعاع الذى تستقبله الفتيلة من البيئة المحيطة .

■ 41 ـ استخدم لوح أسود ($e = 0.90$) كمجمع شمسى . وضع اللوح فى ضوء الشمـس المباشر فكـان معـدل امتصاصـه للطاقـة 800 W لكل متر مربع من سطحه . إلى أى درجة حرارة يصل اللوح عند الاتزان ؟ افترض أن السطح الخلفى للوح معـزول عزلاً مثاليًا وأن السطح الأمامى يفقد الطاقة بالإشعاع فقط .

■ 42 ـ يمتص مجمع شمسى فى نظام لتسخين الماء الإشعاع الشمسى بمعدل قدره $660\ W/m^3$. فإذا علمت أن مسـاحة السـطح المجمع $3.8\ m^2$ ودرجة حرارة الماء البارد الداخل إلى المجمع 15°C ، فما هو حجم الماء الخارج من المجمع فـى الدقيقـة إذا كانت درجة حرارته 60°C ؟

القسم 11-12

43 ـ ما هى القيمة R لطبقة سمكها 1.4 cm مصنوعة من (أ) الزجاج ؟ (ب) الخشب الرقائقي (الأبلكاج) ؟ استخدم القيم المعطاة بالجدول 4-11 .

■ 44 ـ إذا كانت الماسورة المذكورة فى المسألة 37 ملفوفة بطبقة من الألياف الزجاجية سمكها 3.0 cm ، بأى نسبة يقل الفقد الحرارى منها ؟

45 ـ قارن بين معدلات الفقد الحرارى خلال الحوائط الآتية ، بفرض أن الفرق بين درجتى الحرارة بالداخل والخارج متساوى فى جميع الحالات : (أ) طبقة سمكها 15.0 cm من الألياف الزجاجية بين لوحين من الجبس سمك كل منهما 1.75 cm . (ب) حائط خرسانى سمكه 30 cm مغلف من الجانبين بألواح سمكها 2.0 cm من الأبلكاج ، (جـ) شباك ذو زجاج مزدوج .

مسائل عامة

46 ـ يتدفق الماء فى صورة تيار مستمر إلى شلال ارتفاعه 70 cm . إذا تحولت طاقة الجهد التثاقلى للماء إلى حرارة ، فما هو الارتفاع فى درجة حرارة الماء عند قاع الشلال عن قيمتها عند قمته ؟

■ 47 ـ اصطدمت طلقة من الرصاص كتلتها 2.5 g عندما كانت متحركة بسرعة قدرها 210 m/s بكيس ملئ بالرمل فتوقفت عن الحركة داخله . (أ) بفرض أن الشغل الاحتكاكي مع الرمل يتحول كلية إلى طاقة حرارية للطلقة ، ما هو الارتفاع فى درجة حرارة الطلقة عند وصولها إلى السكون ؟ (ب) أجب عن نفس السؤال إذا استقرت الطلقة فى قالب خشبى كتلته 90 g يمكنه الحركة بحرية بعد ارتطام الطلقة به .

■■ 48 ـ عمود حديدى طوله 8.5 m ومساحة مقطعه 85 cm² طرفاه مدفونان فى حائطين خرسانيين ، وكانت درجة الحرارة عند تجهيز هذا الهيكل 10°C . ما هى القوة التى يؤثر بها العمود على الحائطين عند ارتفاع درجة الحرارة إلى 34°C ؟ (اعتبر أن معامل يونج للحديد $Y = 19 \times 10^{10}$ N/m²) .

■■ 49 ـ ربط طرفا سلك من النحاس الأصفر فى نقطتين ثابتتين عندما كانت درجة حرارة السلك 700°C . ما هى درجة الحرارة التى ينقطع عندها السلك عند تبريده ؟ مقاومة الكسر للنحاس الأصفر فى حالة الشد تساوى 0.45×10^9 N/m² .

■■ 50 ـ قالب من الصلب حجمه 1.25 m³ عند مستوى سطح البحر ودرجة الحرارة 20°C . ألقى هذا القالب فى المحيط فوصل إلى قاع أخدود محيطى يقع على عمق قدره 11,500 m من السطح ودرجة حرارة الماء فيه 5.5°C . احسب التغير الناتج فى حجم القالب .

■■ 51 ـ تدور كرة منتظمة من الصلب نصف قطرها R_0 وكتلتها M فى حركة مغزلية حول مركزها بسرعة زاوية مقدارها ω_0 عند درجة 27°C . فإذا رفعت درجة حرارة الكرة إلى 350°C بدون أن يؤثر ذلك على انتظام الكرة . فما هى قيمة كل من السرعة الزاوية للكرة وطاقة حركتها الدورانية عند درجة الحرارة الجديدة ؟

■ 52 ـ رفعت درجة حرارة مكعب معدنى طوله الأصلى L_0 بمقدار ΔT فأصبح حجمه $(L_0 + \Delta L)^3$. استخدم هذه البيانات ونظرية ذات الحدين لإثبات أن معامل التمدد الحجمى لمادة المكعب ، كتقريب من الرتبة الأولى ، يساوى 3α ؛ حيث α معامل التمدد الطولى لمادة المكعب .

■ 53 ـ قرص من الألمنيوم كتلته 55 kg ونصف قطره 17.5 cm . بينما كان هذا القرص يدور حول محوره بمعدل قدره 9.9 rev/s استخدمت فرملة فى التأثير على حافة القرص بقوة احتكاك مما سبب توقف القرص . فإذا كان 75 فى المائة من الشغل المبذول بواسطة الاحتكاك يتحول إلى حرارة فى القرص ، فما هى الزيادة الناتجة فى درجة الحرارة ؟

■■ 54 ـ تسقط كرة من الصلب نصف قطرها 0.22 cm فى الماء بسرعة تساوى سرعتها النهائية المعطاة بقانون ستوكس . ما هو معدل تولد الحرارة بواسطة القوة الاحتكاكية التى يؤثر بها الماء على الكرة ؟



قبل معرفة طبيعة الذرات والجزيئات بوقت طويل توصل علماء الفيزياء إلى استنباط طريقة مناسبة وفعالة لمناقشة الحرارة والشغل والطاقة الداخلية . وتتضمن هذه الطريقة وصف المادة بدلالة خواصها الماكروسكوبية* (الإجمالية) كالضغط ودرجة الحرارة والحجم وسريان الحرارة ؛ وهذه الطريقة لوصف سلوك الأجسام والمواد تسمى **الديناميكا الحرارية** . واليوم ، ورغم فهمنا الجيد تمامًا لسلوك الذرات والجزيئات ، ما زالت الديناميكا الحرارية مستخدمة على نطاق واسع فى جميع فروع العلم . ويعتبر هذا الفصل بمثابة مقدمة مبسطة لهذا المجال الهام والنافع من مجالات الدراسة .

12-1 متغيرات الحالة

يناقش سلوك المادة عادة فى الديناميكا الحرارية بدلالة عينة محددة منها تسمى النظام الديناميكى الحرارى . وقد يكون هذا النظام جزيئات الغاز فى إناء ما أو الجزيئات فى محلول ، بل إنه قد يكون نظامًا معقدًا كالجزيئات فى شريط من المطاط . ولكى تكون المناقشة الديناميكية الحرارية ذات معنى يجب أن يكون النظام محددًا تحديدًا دقيقًا ، وفى هذه الحالة فقط يمكننا وصف النظام بطريقة واضحة لا غموض فيها . فمثلاً ، لتصميم تربين بخارى لاستخدامه فى توليد الكهرباء يحتاج المهندسون إلى معرفة ضغط ودرجة

* **الخواص الماكروسكوبية** هى تلك الخواص المتعلقة بالتأثيرات المتوسطة لعدد كبير جدًا من الجزيئات .

حرارة بخار الماء ، وكذلك الحجم الذى يشغله بخار الماء عند مروره خلال التربين . وعند ذلك فقط يستطيع المهندسون معرفة مقدار القدرة الكهربائية التي يمكن أن يولدها التربين من كمية معينة من الطاقة الحرارية .

ولوصف النظام الديناميكي الحرارة فإننا نستخدم كميات معينة تنطبق على النظام بأكمله أو على جزء محدد تحديدًا دقيقًا منه . والكميات النموذجية القابلة للقياس بسهولة والمستخدمة في وصف أى نظام هى الضغط ودرجة الحرارة والحجم . كما تستخدم أيضًا في الديناميكا الحرارية كميات أخرى كالطاقة الداخلية والحرارة والشغل ، وكمية أخرى سنقابلها فيما بعد تسمى الانتروبيا . وإذا تغيرت حالة النظام قد تتغير هذه الكميات كلها أو بعضها . كذلك فإن من المهم أن نعلم أن هذه الكميات تكون مناسبة لتمثيل الحالة المضبوطة للنظام . لنتعرف الآن على هذه الكميات .

عندما يصل إناء يحتوى على عدد قدره n مولاً من غاز مثالى إلى حالة الاتزان سوف يصل كل من حجمه وضغطه ودرجة حرارته إلى قيمة محددة . وإذا علمت أى كميتين من الكميات الثلاث T, P, V ، يمكن حساب الكمية الثالثة من قانون الغاز المثالى (المعادلة 10-1) ، وبالتالى تصبح هى أيضًا معلومة . ويسمى هذا الموقف المحدد ، الذى يتحدد بقيم معينة للكميات T, P, V للغاز (النظام) **بالحالة الديناميكية الحرارية** للنظام . ومتى عاد الغاز (النظام) إلى نفس قيم T, P, V فإن حالة النظام ستعود كما كانت أصلاً . وبالرغم من أن كل جزئ بالنظام قد لا يسلك سلوك الجزيئات الأخرى تمامًا عند وجود النظام في حالة معينة ، فإن خواص النظام ككل ستظل دائمًا كما هى من الناحية الماكروسكوبية .

ويمكن صياغة هذا المعنى بأسلوب آخر كالتالى . **لكل نظام خواص معينة قابلة للقياس تكون لها دائمًا نفس القيمة عندما يتواجد النظام فى نفس الحالة الديناميكية الحرارية ؛ وتسمى المتغيرات التي تصف هذه الخواص بمتغيرات الحالة .** فمثلاً متغيرات حالة نظام مكون من غاز هى P, V, T . ومعنى ذلك أن كل حالة اتزان معينة للغاز تتميز دائمًا بنفس قيم متغيرات الحالة هذه بصرف النظر عن الطريقة التى وصل بها الغاز إلى هذه الحالة .

الطاقة الداخلية للنظام هى كمية هامة أخرى من الكميات المستخدمة لوصف حالة النظام :

الطاقة الداخلية (U) لنظام ما هى مجموع طاقتى الحركة والوضع لجميع الذرات أو الجزيئات المكونة لهذا النظام .

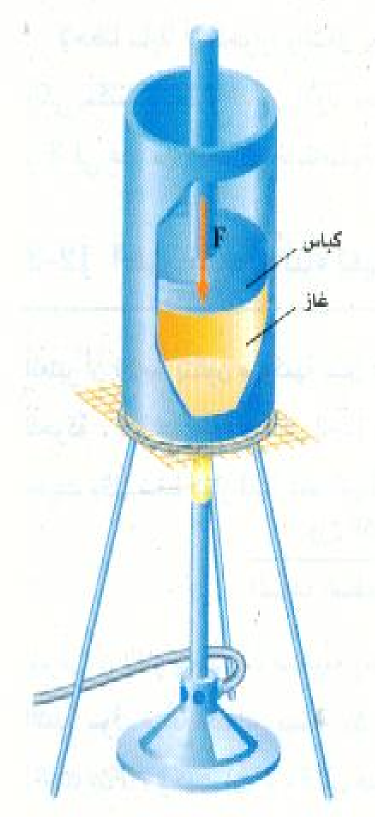
وتعتبر الطاقة الداخلية مثالاً لخاصية من الخواص الفيزيائية التى تسمى **دوال حالة** النظام . وتعرف دالة حالة النظام بأنها تلك الخاصية الفيزيائية التى يمكن تعريفها تمامًا بدلالة متغيرات الدالة . ويمكننا أن نستنتج بناء على ذلك أن قيمة أى من دوال حالة النظام ، كالطاقة الداخلية مثلاً ، **لا تعتمد على نوع العمليات التى يصل بها النظام إلى** حالته المعنية .

الطاقة الداخلية إذن دالة حالة للنظام . وعلى العكس فإن الحرارة والشغل ليسا من دوال الحالة ، وذلك لأن كمية الحرارة المضافة إلى النظام أو الشغل المبذول على النظام لتغيير حالته بمقدار معين تعتمد على العملية المستخدمة لحدوث هذا التغير في الحالة . وبذلك يكون السؤال عن « كمية الحرارة التى يحتوى عليها النظام » سؤالاً لا معنى له . فالنظام لا « يحتوى على » حرارة أو شغل ، لأن هذين المفهومين يمثلان عمليتين لانتقال الطاقة إلى النظام أو من النظام . فالحرارة تمثل انتقال الطاقة الحرارية التى قد تسبب تغير الطاقة الداخلية للنظام . ولكن هذا النوع من انتقال الطاقة يمثل فقط إحدى طرق تغيير الطاقة الداخلية . ذلك أن الطاقة الداخلية يمكن أن تتغير أيضًا نتيجة للشغل الميكانيكى المبذول على النظام ، كالاحتكاك أو الانضغاط على سبيل المثال .

12-2 القانون الأول للديناميكا الحرارية

كان الباحثون القدامى فى مجال الديناميكا الحرارية أول من توصل إلى فكرة بقاء الطاقة . وبعد أن تمكن هؤلاء العلماء من إثبات أن الحرارة صورة من صور الطاقة ، أصبح من الضرورى أن تؤخذ الحرارة فى الاعتبار عند إعداد « حساب الأرباح والخسائر » فى الطاقة ، وبهذه الطريقة أمكنهم التوصل إلى علاقة أساسية هامة بين الحرارة والشغل والطاقة الداخلية . لنتعرف الآن على هذه العلاقة .

لكل نظام فى حالة معينة كمية محددة من الطاقة الداخلية ، وإننا نتساءل الآن عما يحدث للنظام عندما تنساب إليه كمية من الحرارة . هذه الطاقة المضافة يمكن أن تستعمل بطريقتين : (1) زيادة الطاقة الداخلية للنظام ، أو (2) إمداد النظام بالطاقة التى يحتاجها لكى يبذل كمية من الشغل W على الوسط المحيط به . فإذا أخذنا النظام الموضح بالشكل 1-12 والذى يمثل غازًا فى أسطوانة فإننا سنجد أن الطاقة المضافة يمكنها أن تسبب تغيرين فى النظام : (1) رفع درجة حرارة الغاز ومن ثم زيادة طاقته الداخلية ، (2) تمدد الغاز مما يؤدى إلى رفع الكباس إلى أعلى مما يسمح للغاز بأن يبذل شغلاً على الكباس .



شكل 1-12:
عند إضافة الحرارة إلى الغاز الموجود فى الإناء يمكن أن تزداد طاقته الداخلية ، كما يمكن للغاز أن يبذل شغلاً ضد القوة الخارجية المؤثرة على الغاز بواسطة المكبس نتيجة لتمدد الغاز .

وإذا فحصنا أى نظام فإننا سنجد أن الطاقة المضافة إليه تستهلك دائمًا بنفس هاتين الطريقتين ، وهكذا يمكننا أن نستنتج أن :

(الشغل الخارجى المبذول بواسطة النظام) + (الزيادة فى الطاقة الداخلية للنظام) = (الطاقة المضافة إلى النظام)

وهذه الصيغة تسمى القانون الأول للديناميكا الحرارية ، والذى يمكن كتابته فى صورة المعادلة :

$$Q = \Delta U + W \qquad (12\text{-}1)$$

لاحظ أن القانون الأول هو صيغة خاصة لقانون بقاء الطاقة تتضمن الطاقة الداخلية .

عند تطبيق القانون الأول يجب مراعاة الحرص الشديد فى اختبار الإشارات الصحيحة للكميات الداخلة فيه . فالكمية Q هى دائمًا كمية الحرارة المنسابة **إلى النظام** ، أما إذا كانت الحرارة تنساب **من النظام** فإن Q تكون سالبة . كذلك فإن ΔU هى **الزيادة** فى الطاقة الداخلية للنظام ، بينما W يمثل الشغل المبذول **بواسطة النظام** . فإذا كان الغاز فى الشكل 2–12 يسبب ارتفاع الكباس إلى أعلى ، فإن الغاز يبذل شغلاً خارجيًا ويكون W موجبًا . أما إذا دفع الكباس إلى أسفل بواسطة قوة خارجية فإن W سيكون سالبًا لأن الغاز يبذل شغلاً سالبًا . ولفهم هذه العبارة الأخيرة ، تذكر أن :

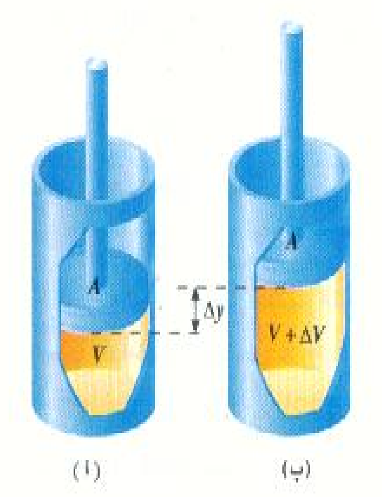
$$\text{الشغل} = \text{القوة} \times \text{الإزاحة} \times \cos\theta$$

حيث θ هى الزاوية بين متجه القوة ومتجه الإزاحة . ويلاحظ فى الشكل 1–12 أن القوة التى يؤثر بها الغاز على الكباس إلى **أعلى تساوى F** (بفرض أن الكباس يتحرك بسرعة ثابتة) . وعندما يتحرك الكباس إلى **أسفل** مسافة قدرها Δs فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز سيكون :

$$W = F\,\Delta s\cos 180^\circ = -F\,\Delta s$$

إذن : عندما **ينضغط الغاز يكون الشغل المبذول بواسطته سالبًا .**

لاحظنا سابقًا أن الحرارة والشغل يعتمدان على الطريقة التى تتغير بها حالة الغاز . ولكى يمكننا استخدام القانون الأول يجب علينا الآن دراسة طرق حساب كل من Q و W فى عدد من العمليات الديناميكية الحرارية .



شكل 2–12:
إذا كانت المساحة السطحية للكباس A فإن : $\Delta V = A\Delta y$.

3–12 الشغل المبذول أثناء تغير الحالة الديناميكية الحرارية

لنعتبر أن نظامنا يتكون من كمية من غاز محبوس فى أسطوانة مغلقة بكباس قابل للحركة ، كما هو مبين بالشكل 2–12 . ولنفرض أن الغاز يحمل بالكاد وزن هذا الكباس بحيث يظل ضغط الغاز ثابتًا عند القيمة المعطاة بالعلاقة :

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\text{وزن الكباس}}{\text{المساحة السطحية للكباس}}$$

لنفرض أن الغاز يتمدد عند تسخينه بمقدار ΔV كما هو مبين بالجزء (ب) . أثناء هذا التمدد سوف يرتفع الكباس مسافة Δy ، ويكون الشغل المبذول بواسطة الغاز أثناء التمدد $(F\Delta y\cos\theta)$. وحيث أن $\theta = 0^\circ$ فى هذه الحالة إذن :

$$W = F\,\Delta y = PA\,\Delta y$$

وحيث أن $A\,\Delta y$ هى الزيادة فى حجم الغاز ΔV ، إذن :

$$W = P\,\Delta V \qquad (12\text{–}2)$$

وإذا فقدت الحرارة من النظام فإن الغاز ينكمش ، وعندئذ تكون ΔV سالبة ، وبالتالى



تعتبر آلة الاحتراق الداخلى مثالاً أصيلاً للآلة الحرارية . وفى هذه الآلة تبذل الطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق خليط الوقود والهواء شغلاً على الكباسات ، وهذا بدوره يسبب دوران العمود المرفقى وتحرك السيارة . ويلاحظ هنا أن الجزء الأعظم من الطاقة الحرارية يفقد فى صورة عادم حرارى فى الغازات المنصرفة .

يكون الشغل المبذول بواسطة الغاز سالبًا أيضًا . وفى تلك الحالة يقال أن الوسط المحيط قد بذل شغلاً على النظام .

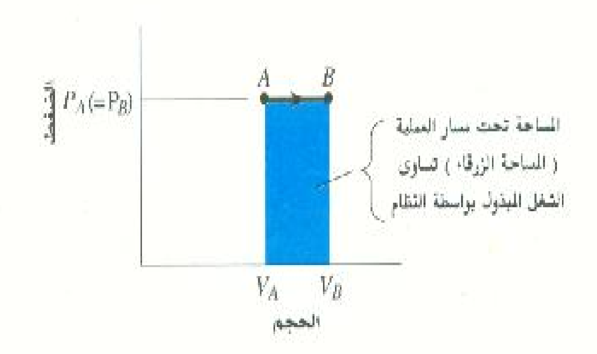
ومن الطبيعى أن التمدد عند ثبوت الضغط ما هو إلا إحدى الطرق العديدة التى يمكن أن يتغير بها حجم النظام ، وفى حالة ثبوت الضغط يكون حساب الشغل أمرًا فى غاية البساطة : $W = P \Delta V$. ولكن الشغل يبذل دائمًا (بواسطة النظام أو على النظام) طالما كان هناك تغير فى حجم النظام ، وبصرف النظر عن العملية التى يتغير بها الحجم . هذا يوضح بجلاء حاجتنا إلى طريقة عامة لحساب الشغل فى كل من العمليات الديناميكية الحرارية ، وليس فقط فى العمليات ثابتة الضغط . ويمكن تحقيق ذلك بالاستعانة بمنحنى الضغط مقابل الحجم ، والذى يسمى **بالرسم البيانى PV** (شكل 3-12) . وتتضح أهمية مثل هذا المنحنى فى أن **أى نقطة على الرسم البيانى PV تمثل حالة ديناميكية حرارية معينة للغاز** . ذلك أنه إذا علمنا قيمتى P و V للغاز يمكن حساب درجة الحرارة باستخدام قانون الغاز المثالى .

النقطتان A و B فى الشكل 3-12 تمثلان حالتين مختلفتين لعينة من غاز عند نفس الضغط $P_A = P_B = P$. أما الخط الواصل من A إلى B **فيمثل العملية** التى تؤدى إلى تغيير حلة الغاز ، ويلاحظ أن اتجاه السهم على هذا الخط يوضح الطريقة التى يحدث بها التغير فى الحالة . ويوضح الخط الأفقى المستقيم أن التغير يحدث عند ثبوت الضغط . وتجدر الإشارة فى هذه النقطة إلى أنه يمكن توصيل النقطة A بالنقطة B بعدد لا نهائى من المسارات التى يمثل كل منها عملية ديناميكية حرارية مختلفة ، وبالتالى كمية مختلفة من الشغل .

نحن نعلم الآن كيفية حساب الشغل أثناء العملية ثابتة الضغط الموضحة بالشكل 3-12 :

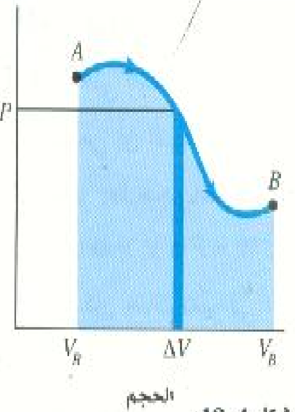
$$W = P \Delta V = P (V_B - V_A)$$

لاحظ أن $P (V_B - V_A)$ **هى المساحة تحت الخط AB** ، أى مساحة المستطيل الأزرق بالشكل 3-12 . لنفترض الآن أن الغاز يمر بعملية انضغاط من الحالة B إلى الحالة A . عندئذ سيكون ΔV ، ومن ثم W ، سالبًا ، مما يشير إلى أن الشغل يبذل **على** النظام فى هذه الحالة . وحيث أن المساحة تحت الخط لم تتغير ، من الضرورى إذن استخدام الإشارة الجبرية الصحيحة وذلك بملاحظة ما إذا كان الحجم يزداد (+) أو يقل (-) .



شكل 3-12:
الشغل المبذول بواسطة النظام أثناء التمدد عند ثبوت الضغط يساوى المساحة تحت المنحنى PV .

لنعمم الآن هذه النتيجة . اعتبر العملية الاختيارية (الاعتباطية) الممثلة بالمنحنى AB فى الشكل 12-4 . فى مثل هذه الحالة تتغير الكميات P, V, T كلها أثناء العملية ، ولكن المنطقة ذات اللون الأزرق الغامق فى الشكل تمثل جزءًا صغيرًا جدًا من العملية ، صغيرة إلى درجة تكفى لاعتبار الضغط ثابتًا أثناءها . وهكذا فإن الشغل المبذول فى هذا الجزء من العملية يساوى $P\Delta V$. ولإيجاد الشغل الكلى المبذول خلال العملية من A إلى B كلها ، يمكننا النظر إلى هذه العملية كما لو كانت مكونة من عدد كبير جدًا من مثل هذه التغيرات الحجمية الصغيرة ، والتى يبذل خلال كل منها كمية من الشغل تساوى المساحة المحصورة تحت المنحنى PV الخاص بها . وعليه فإن الشغل الكلى المبذول يساوى مجموع هذه المساحات الصغيرة ؛ أى المساحة المحصورة تحت المنحنى من A إلى B (المساحة الملونة باللون الأزرق الفاتح) . وهكذا يستنتج أن :



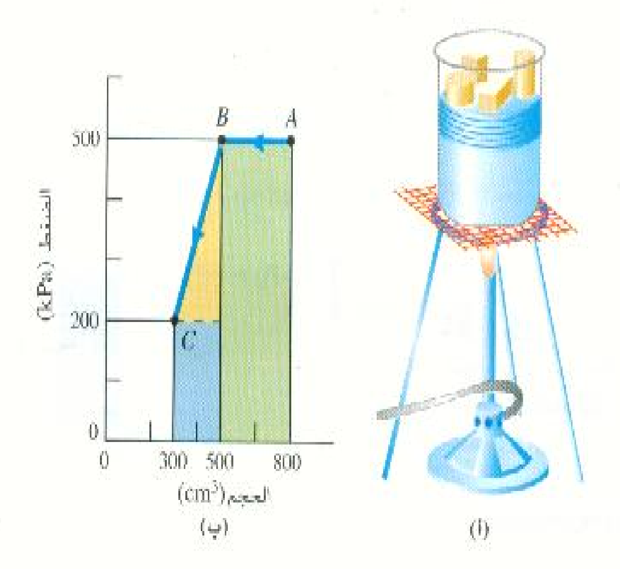
شكل 12-4: الشغل المبذول بواسطة النظام عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة B بأى عملية ديناميكية حرارية يساوى المساحة المحصورة تحت المنحنى PV الذى يمثل العملية .

الشغل المبذول أثناء تغير الحالة الديناميكية الحرارية يساوى المساحة المحصورة تحت منحنى العملية فى الرسم البيانى PV .

ويكون الشغل موجبًا عند زيادة الحجم نتيجة للعملية الديناميكية الحرارية ، ويكون سالبًا عند نقصه .

مثال توضيحى 12-1

أضيفت الأثقال تدريجيًا على الكباس الموضح بالشكل 12-5 أ أثناء تغير درجة حرارة الغاز فى الأسطوانة بحيث انكمش الغاز بالطريقة الموضحة بالرسم البيانى PV للنظام ، والمبين بالشكل 12-5 ب . أوجد الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى B إلى C .



شكل 12-5: ما هى كمية الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى الحالة C بالعملية الممثلة بالمسار ABC ؟

استدلال منطقي : يجب حساب المساحة المحصورة تحت المنحنى . لاحظ أن هذا الشكل غير المنتظم مكون من ثلاثة أشكال بسيطة : المستطيلان الأخضر والأزرق ، والمثلث الأصفر . علينا إذن حساب مساحة كل من هذه الأشكال البسيطة ثم جمع المساحات الناتجة لنحصل على المساحة المطلوبة . المساحة تحت الجزء الأخضر AB هي :

$$(5.0 \times 10^5 \text{ Pa}) [(800 - 500) \times 10^{-6} \text{ m}^3] \text{ F} = 150 \text{ J}$$

[لاحظ أن $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ، ومن ثم فإن $(1 \text{ Pa})(1\text{m}^3) = 1 \text{ N . m} = 1 \text{ J}$] . وبالمثل ، المساحة المحصورة تحت المنحنى من B إلى C هي :

$$(2.0 \times 10^5 \text{ Pa})(200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) + \frac{1}{2}(3.0 \times 10^5 \text{ Pa})(200 \times 10^{-6} \text{ m}^3) = 70 \text{ J}$$

حيث استخدمنا حقيقة أن مساحة المثلث يساوى نصف حاصل ضرب طول القاعدة فى الارتفاع . إذن :

$$PV \text{ المساحة تحت المنحنى} = 150 \text{ J} + 70 \text{ J} = 220 \text{ J}$$

وحيث أن العملية التى نعالجها فى هذا المثال تتضمن نقصًا فى الحجم ، فإن الشغل المبذول بواسطة الغاز يكون سالبًا . وهكذا فإننا نستنتج أن الشغل المبذول بواسطة الغاز عند انتقاله من الحالة A إلى C مرورًا بالحالة B يساوى -220 J .

تمرين : ما مقدار الشغل المبذول بواسطة الغاز إذا كان الرسم البيانى PV للعملية على صورة خط مستقيم من A إلى C ؟ **الإجابة :** -180 J .

وإذا كانت المسارات المثلة للعمليات الديناميكية الحرارية فى الرسم البيانى PV تعطى مساحات لا يمكن حسابها باستخدام المعادلات الهندسية البسيطة ، يمكننا تقريب المساحة المحصورة تحت المنحنى برسم العملية على ورقة رسم بيانى ثم عد المربعات الموجودة تحت المنحنى .

12-4 الطاقة الداخلية لغاز مثالى

علمنا فى الفصل العاشر أن طاقة الحركة الانتقالية الكلية لغاز مثالى تعتمد على درجة حرارة الغاز :

$$\text{KE}_{\text{trans}} = N(\overline{\text{KE}}) = N(\frac{3}{2}kT) = n(\frac{3}{2}RT) \qquad (4\text{-}10)$$

حيث N عدد جزيئات الغاز ، n عدد المولات من الغاز ، k ثابت بولتزمان . وسوف نحاول هنا فهم العلاقة السببية بين طاقة الحركة الانتقالية KE_{trans} والطاقة الداخلية للغاز U .

من المعلوم أن الغازات المكونة من ذرات فردية ، كالهليوم والأكسجين أحادى الذرة ، ليس لها طاقات داخلية أخرى خلاف طاقة الحركة الانتقالية* . وبناء على ذلك يمكننا ـ فى حالة الغازات أحادية الذرة ـ اعتبار أن الطاقة الداخلية تساوى طاقة الحركة الانتقالية :

$$U = KE_{trans} = \frac{3}{2}\, nR\Delta T$$ (للغاز أحادى الذرة)

ويستنتج من ذلك أن التغير فى درجة حرارة الغاز أحادى الذرة يرتبط بالتغير فى طاقته الداخلية طبقًا للعلاقة :

$$\Delta U = \frac{3}{2} nR\,\Delta T \qquad (12\text{–}3)$$

ولكن الطاقة الداخلية فى حالة الغازات المكونة من جزيئات يمكن أن تتكون من الطاقتين الدورانية والتذبذبية بالإضافة إلى الطاقة الانتقالية . ذلك أن الذرات المكونة للجزيئات يمكنها أن تتذبذب فى اتجاه الروابط الكيميائية التى تربط بينها فى الجزىء . وعلاوة على ذلك فإن عزم القصور الذاتى لمثل هذه الجزيئات حول المحاور العمودية على هذه الروابط يكون كبيرًا ولا يمكن إهماله . ولذلك فإن الطاقة الداخلية U للغازات ثنائية الذرة (المكونة من ذرتين لكل جزئ) والغازات عديدة الذرات (المكونة من ثلاث ذرات فأكثر لكل جزئ) تكون أكبر من قيمتها فى حالة الغازات أحادية الذرة عند نفس درجة الحرارة ، ولكن المناقشة التفصيلية للجزيئات المركبة لا تقع ضمن أهداف هذا المقرر . ومع ذلك فقد ثبت أن الطاقة الداخلية U يمكن دائمًا كتابتها فى صورة عدد صحيح K مضروبًا فى $\frac{1}{2}nRT$.

$$U = K(\frac{1}{2} nRT)$$

فمثلاً ، $K = 3$ للغازات أحادية الذرة ، وهذا يعطى المعادلة (3–12) السابقة . أما فى حالة الغازات الأخرى فإن K يكون عددًا صحيحًا يساوى 3 أو أكبر من 3 ، وهذا يتوقف على نوع الغاز ودرجة حرارته .

يلاحظ من المعادلة (3–12) أن الطاقة الداخلية U لجميع الغازات المثالية تعتمد على متغير حالة واحد فقط هو T . وعليه فإن U هى متغير حالة أيضًا . وبذلك يمكننا أن نستنتج ما يلى :

عندما تتغير حالة أى غاز مثالى ، يعتمد التغير فى الطاقة الداخلية على درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية فقط ، وليس على نوع العملية التى تتغير بها حالة الغاز المثالى .

---

* أهملنا الطاقة الداخلية المرتبطة بالإلكترونات والبروتونات والنيوترونات فى الذرة . ذلك أن التغيرات فى مركبات الطاقة الداخلية هذه لا تكون محسوسة إلا عند درجات الحرارة العالية جدًا ، والتى لن نتعامل معها فى هذا المقرر .

12-5 انتقال الحرارة والحرارتان النوعيتان للغازات المثالية

تعتمد كمية الحرارة المنتقلة إلى الغاز أو منه ، كالشغل تمامًا ، على تفاصيل العملية المستخدمة . (ولهذا فإن Q ليست دالة حالة للنظام) . وهناك نوعان من العمليات التي يمكن فيهما حساب الانتقال الحرارى مباشرة بمنتهى السهولة وهما : العمليات ثابتة الحجم والعمليات ثابتة الضغط .

العمليات ثابتة الحجم

عندما تضاف الحرارة إلى غاز مع حفظ حجمه ثابتًا **يكون الشغل المبذول صفرًا** (لأن $\Delta V = 0$) . ويخبرنا القانون الأول للديناميكا الحرارة أن الحرارة المضافة فى هذه الحالة تستهلك فى زيادة الطاقة الحرارية :

$$Q = \Delta U \quad \text{(عند ثبوت الحجم)} \qquad (12\text{-}4)$$

ولكننا نعلم من المعادلة (3-12) أن العلاقة بين ΔU و ΔT فى حالة الغازات أحادية الذرة تكون على الصورة $\Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$. وعليه ، يمكننا تمثيل العلاقة بين الحرارة المنتقلة إلى الغاز Q والتغير الناتج فى درجة حرارته ΔT بالمعادلة :

$$Q = \Delta U = \frac{3}{2} nR\Delta T$$

حتى هذه النقطة لم نتعرف إلا على كمية واحدة تربط بين كمية الحرارة Q والتغير الناتج فى درجة الحرارة ΔT لكمية معينة من المادة ، وهذه الكمية هى الحرارة النوعية للمادة $c = Q / m\,\Delta T$ ، حيث m كتلة العينة (المعادلة 1-11) . ولكن كمية المادة تقاس عادة فى حالة الغازات بالمولات ، ومن ثم يمكننا تعريف **الحرارة النوعية الجزيئية (أو المولارية)** C كالتالى :

$$C = \frac{Q}{n\Delta T} \qquad (12\text{-}5)$$

حيث n عدد المولات من الغاز . وحيث أن هذه النسبة تعتمد على نوع عملية الانتقال الحرارى ، علينا تمييز C برمز مناسب يشير إلى العملية التى نتحدث عنها . ولذلك فإننا سنستخدم الرمز C_V فى حالة العمليات ثابتة الحجم .

وباستخدام المعادلتين (3-12) و (4-12) سنجد أن $Q = \frac{3}{2} nR\Delta T$ ، وبالتعويض من هذه العلاقة الأخيرة فى المعادلة (5-12) سنحصل على العلاقة البسيطة الآتية :

$$C_V = \frac{3}{2} R \quad \text{(للغازات أحادية الذرة)}$$

أما فى حالة الجزيئات الأكثر تعقيدًا فإن نفس الطريقة تعطينا النتيجة العامة الآتية :

$$C_V = K\frac{R}{2}$$

حيث K عدد صحيح كما ذكرنا في القسم السابق .

العمليات ثابتة الضغط

رأينا سابقًا أن $W = P\,\Delta V$ في العمليـة ثابتـة الضغط ، وبنـاء علـى ذلك يمكـن كتابـة القانون الأول في هذه الحالة على الصورة :

$$Q = \Delta U + W = \Delta U + P\,\Delta V \qquad (12\text{–}6 \text{ أ})$$

وعندما يكون P ثابتًا فإن قانون الغاز المثالي يعطينا :

$$P\,\Delta V = nR\,\Delta T$$

وعليه فإن :

$$Q = \Delta U + nR\,\Delta T \qquad (12\text{–}6 \text{ ب})$$

وكما سبق أن عرفنا C_V ، تعرف الحرارة النوعية الجزيئية عنـد ثبـوت الضغـط C_P كالتالي :

$$C_P = \frac{Q}{n\Delta T} = \frac{\Delta U + P\Delta V}{n\Delta T}$$

$$= \frac{\Delta U}{n\Delta T} = \frac{nR\Delta T}{n\Delta T} = C_V + R$$

وحيث أن هذه النتيجة لا تعتمد على نوع الغاز ، إذن :

$$C_P = \frac{3}{2}R + R = \frac{5}{2}R \quad \text{(للغازات أحادية الذرة)}$$

$$C_P = K\frac{R}{2} + R = (K+2)R \quad \text{(للغازات الجزيئية)}$$

ليس من الغريب أن تكون C_P أكبر دائمًا مـن C_V . فعنـد ثبـوت الضغـط يستهلك بعض الحرارة في بذل الشغل الخارجي (رفع الكباس فـي الشكـل 1–12 مثـلاً) ، ويستهلك الجزء الباقي في زيادة الطاقة الداخلية ، أي فـي رفـع درجـة الحـرارة . إذن ، كلما كانت الحرارة النوعية كبيرة ، كلما قل التغير في درجة الحرارة لنفس كمية الحرارة المنتقلة .

يرمز للنسبة بين الحرارتين النوعيتين في هاتين العمليتين بالرمز γ ، أي أن :

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} \qquad (12\text{–}7)$$

جدول 1–12 : الحرارة النوعية الجزيئية والكتلية للغازات

الغاز	$\frac{C_V}{R}$	$\frac{C_P}{R}$	$\gamma = \frac{C_P}{C_V}$	$\frac{C_P - C_V}{R}$	$c_v\ (J/kg.K)$
He	1.50	2.49	1.66	0.99	3,130
Ne	1.50	2.46	1.64	0.96	620
Ar	1.50	2.50	1.67	1.00	310
Kr	1.50	2.52	1.68	1.02	150
Xe	1.50	2.49	1.66	0.99	95
Hg (360°C)	1.50	2.50	1.67	1.00	62
O_2	2.48	3.48	1.40	1.00	650
N_2	2.48	3.48	1.40	1.00	740
H_2	2.40	3.39	1.41	0.99	10,000
CO	2.46	3.48	1.41	1.02	730
HCl	2.51	3.54	1.41	1.03	810
CO_2	3.37	4.37	1.30	1.00	640
H_2O (200°C)	3.23	4.23	1.31	1.00	1,500
CH_4	3.24	4.24	1.31	1.00	1,690

عند درجة 15°C لجميع الغازات ما لم ينص على غير ذلك .

يمثل الجدول 1–12 القيم المقاسة عمليًا للحرارتين النوعيتين C_P و C_V والنسبة بينهما γ لعدد من الغازات . لاحظ أن $\gamma = 1.67$ للغازات أحادية الذرة ، وأن القيمة النظرية المعطاة بالمعادلة (7–12) هي $\gamma = \frac{5}{2} / \frac{3}{2} = 1.67$! كذلك فإن قيم γ للغازات الأخرى يمكن استخدامها لحساب قيمة K لكل غاز ، إذ أن معادلاتنا السابقة تبين أن $\gamma = (K+2)/K$. ففي حالة الغازات ثنائية الذرة يلاحظ من الجدول أن $\gamma = 1.40 = \frac{7}{5}$ ؛ وهذا يعني أن $K = 5$. أما بالنسبة للجزيئات المركبة فإن $\gamma = 1.3 = \frac{4}{3}$ ، وهذه القيمة بالنسبة γ تناظر $K = 6$. نستنتج من ذلك إذن أن التجربة تؤيد ما توقعناه سابقًا بأن K عدد صحيح ؛ هذا وسوف نعود مرة أخرى إلى مناقشة معنى قيمة K في القسم 8–12.

وكاختبار آخر لصحة المعادلات السابق اشتقاقها للحرارتين النوعيتين للغازات يمكننا استخدام العلاقة الآتية :

$$C_P - C_V = R \qquad \text{أو} \qquad \frac{C_P}{R} - \frac{C_V}{R} = 1$$

وبالرجوع إلى العمود قبل الأخير في الجدول 1–12 سنجد أن هذا صحيح لجميع الغازات .

مثال توضيحى 2-12

احسب كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة 2.00 moles من غاز الـهيليوم He من درجة 20.0° إلى 50.0°C باستخدام (أ) عملية ثابتة الحجم ، (ب) عملية ثابتة الضغط . كرر هذه الحسابات لغاز ثانى أكسيد الكربون CO_2 .

المعادلات المناسبة فى هذا الموقف هى :

بالنسبة للجزء (أ) : $Q = nC_V \Delta T$

بالنسبة للجزء (ب) : $Q = nC_P \Delta T$

وبالرجوع إلى الجدول 1-12 نجد أن $C_V = 1.50\,R$ و $C_P = 2.49\,R$ فى حالة الهليوم He . إذن ، بالنسبة إلى الـهليوم :

(أ) $Q = (2.00\text{ mol})(1.50)(8.315\text{ J/mol.C°})(3.0.0\text{°C}) = 748\text{ J}$

(ب) $Q = (2.00\text{ mol})(2.49)(8.315\text{ J/mol.C°})(3.0.0\text{°C}) = 1240\text{ J}$

وحيث أن الارتفاع فى درجة الحرارة متساو فى الحالتين ، إذن لابد أن يكون التغير فى الطاقة الداخلية واحدًا أيضًا : $\Delta U = 748\text{ J}$. معنى ذلك إذن أن كمية الحرارة الزائدة فى الجزء (ب) قد استهلكت فى بذل الشغل أثناء التمدد .

أما فى حالة ثانى أكسيد الكربون فإن $C_V = 3.37\,R$ و $C_P = 4.37\,R$. وهكذا فإن كميتى الحرارة المطلوب حسابهما فى هاتين العمليتين تكونان كالتالى :

(أ) $Q = \left(\frac{3.37}{1.50}\right)(745\text{ J}) = 1680\text{ J}$

(ب) $Q = \left(\frac{4.37}{2.90}\right)(1242\text{ J}) = 2180\text{ J}$

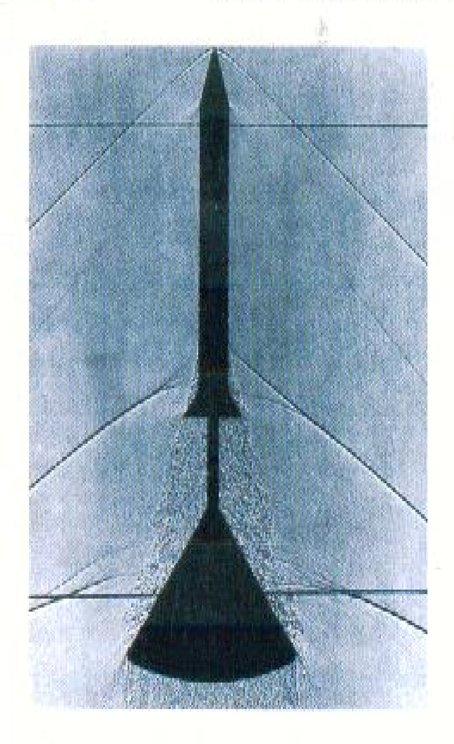
لاحظ هنا أيضًا أن الفرق بين كميتى الحـرارة السابقتين ، وقدره 500 J يمثل الطاقة المتاحة لبذل الشغل أثناء التمدد ، وهو يساوى تقريبًا نفس قيمته فى حالة الـهيليوم . ولكن كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة ثانى أكسيد الكربون أكبر من قيمتـها فى حالة الـهليوم وذلك لأن الجزيئات تمتص بعض الطاقة الإضافية نتيجة لدورانها .

6-12 العمليات الديناميكية الحرارية النمطية فى الغازات

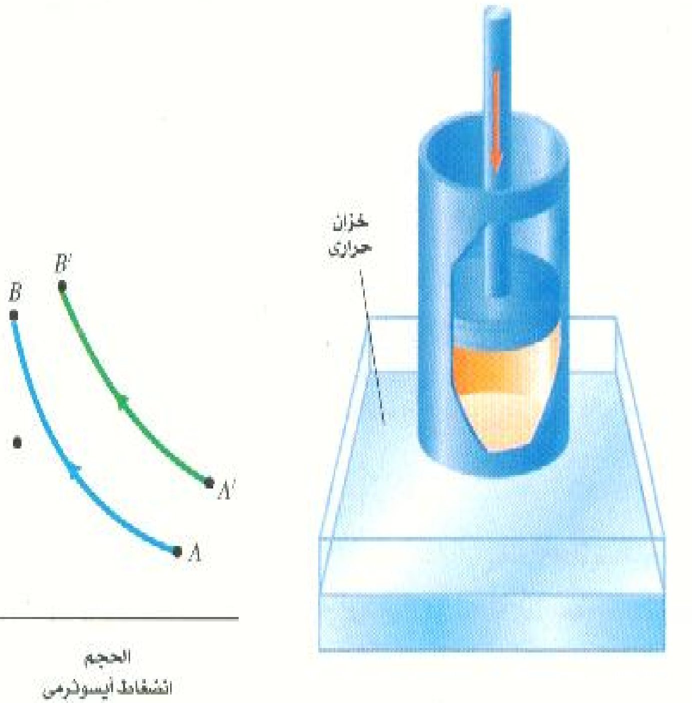
عندما نرسم الرسم البيانى PV ، الذى يمثل ببساطة كيفية تغير P مع V ، يفترض أن التغيرات التى تحدث فى النظام بطيئة بدرجة كافية لكى يصبح الضغط ودرجة الحـرارة منتظمين فى جميع أجزاء النظام فى أية لحظة .

وقد ناقشنا سابقًا عمليتين تحدث التغيرات فى النظام خلالـهما مع بقاء إحدى الكميات الديناميكية الحرارية ثابتة . أولى هاتين العمليتـين هى العمليـة **ثابتـة الحجـم** (والتى تسمى أحيانًا بالعملية **الأيسوكورية**) ، وهـذه العمليـة تمثـل بخـط رأسـى فـى الرسم البيانى PV . أما العملية الثانية فهى العملية ثابتة الضغط (**أو الأيسـوبارية**) ،

والتى تمثل بخط أفقى فى الرسم البيانى PV . لنتعرف الآن على عمليتين أخريين تتمان فى النظام عند ثبوت بعض الكميات الديناميكية الحرارية الأخرى .



توضح هذه الصورة الفوتوغرافية التغير الحادث فى الكثافة خلال موجة صدمية فى نفق رياح فوق صوتى . وأحيانا يكون التضاغط الأدياباتى (لماذا أدياباتى ؟) من الشدة بحيث يصبح الغاز خلف الموجة مضيئا وهذا ما نشاهده مثلا فى الموجات الصدمية الناتجة عن تفجير المفرقعات .



شكل 6–12 :
الرسم البيانى PV لانضغاط أيسوثرمى . الأيسوثرم $A'B'$ يمثل العلاقة بين الضغط والحجم عند درجة حرارة أعلى من AB . لماذا ؟

العملية ثابتة درجة الحرارة (الأيسوثرمية)

يقال أن العملية أيسوثرمية إذا تغيرت حالة النظام عند ثبوت درجة حرارته*

* عند رسم المنحنى PV يفترض أن التغيرات التى تحدث فى النظام بطيئة بدرجة كافية لكى يكون الضغط ودرجة الحرارة منتظمين فى كل أجزاء النظام عند أية لحظة .

وحيث أن الطاقة الداخلية تعتمد على درجة الحرارة فقط ، إذن $\Delta U = 0$ أثنـاء العمليـة الأيسوثرمية . وفى هذه الحالة يتحول القانون الأول إلى الصورة :

$$Q = W \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية)} \tag{12-8}$$

وهكذا فإن كل الحرارة المضافة تستهلك فى بذل الشغل أثناء التمدد الأيسـوثرمى . والعكس صحيح أيضًا ، فإن الشغل المبذول على الغـاز أثناء الانضغـاط الأيسوثرمى سوف يفقد كحرارة إلى الوسط المحيط . ويمثل الشكل 6–12 أ وعاء يحتوى على كمية من غاز مثالى فى حالة تلامس حرارى جيد مع خزان حرارى (فرن أو حمام تبريد أو جـهاز آخـر يمكنـه أن يمد الغاز بالحرارة أو يستقبلـها منه مع بقاء درجـة حرارتـه ثابتـة) . فـإذا وضعت الأثقال ببطء شديد على الكباس سوف يزداد ضغط الغاز ويقل حجمه ببطء شديد .

وحيث أن قانون الغاز المثالى ينص على أن حاصل الضرب PV يسـاوى مقدارًا ثابتًـا عند ثبوت درجة الحرارة ، فإن هذا يعنـى بالتـالى أن P يتناسـب **عكسـيًا** مـع V أثنـاء العملية الأيسوثرمية :

$$PV = \text{constant}$$

أو :

$$P = \frac{\text{constant}}{V} \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية والغاز المثالى)} \tag{12-9}$$

هـذه المعادلة تعطينا مسار العملية الأيسوثرمية (والذى يسمى **أيسوثرم**) فـى الرسم البيانى PV ، والموضح بالشكل 6–12 ب . ويجـب أن يلاحـظ هنـا أنـه كلما ارتفعت درجة حرارة الأيسوثرم ، كلما بعد موضعه بالنسبة إلى محورى الإحداثيات ؛ فالأيسـوثرم الأخضر $A'B'$ فى الشكل 6–12 ب يمثل درجة حرارة أعلى من الأيسوثرم الأزرق AB .

مـن الممكن اشتقاق تعبير للشغل المبذول أثناء العملية الأيسوثرمية باستخدام طرق حسـاب التفاضل والتكامل . ونظرًا لأن اشتقاق هذه العلاقة فوق المستوى الرياضى المطلوب لـهذا المقرر ، فإننا سنكتب النتيجة النهائية هنا بدون برهان :

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad \text{(للعملية الأيسوثرمية والغاز المثالى)}$$

حيث T هـى درجـة الحـرارة المطلقـة للأيسـوثرم ، V_f و V_i همـا الحجمـان النـــهائى والابتدائى للغاز ؛ أما الدالة ln فتمثل اللوغاريتم الطبيعى (انظر الملحـق 3) . ويلاحـظ أن هذا التعبير الرياضى يعطى الشغل بالإشارة الصحيحة . ذلك أن ln أى عدد أصغر من 1 يكون سالبًا ، وهذه هى حالة انضغاط الغاز ، حيث $V_f < V_i$.

العملية صفرية الانتقال الحرارى

عمليتنا الرابعة هى تلك العملية التى تتغير فيها الحالة الديناميكية الحرارية للنظام **بدون تبادل حرارى** بين النظام والوسط المحيط ، وتعرف **بالعملية الأدياباتيـة** . فمثلاً ، إذا عزل النظام عزلاً حراريًا جيدًا عن الوسط المحيط يمكن عادة إهمال أى تبادل حـرارى

بينهما ، وبذلك تكون جميع العمليات التى تحدث داخل النظام عمليات أدياباتية . كذلك إذا أجريت العملية بسرعة فائقة (كالانضغاط الفجائى السريع لغاز مثلاً) ، فإن كمية الحرارة التى تنتقل من أو إلى النظام خلال تلك الفترة الزمنية القصيرة تكون صغيرة جدًا بحيث يمكن إهمالها . وعليه فإن تلك العملية تكون أدياباتية أيضًا .

بناء على ذلك يمكننا أن نفترض أن $Q = 0$ فى العمليات الأدياباتية ، وفى هذه الحالة يأخذ القانون الأول $Q = \Delta U + W$ الصورة :

$$\Delta U = -W \quad \text{(للعمليات الأدياباتية)} \qquad (12\text{–}10)$$

هذه العلاقة تبين لنا أنه **إذا بذل النظام شغلاً أدياباتيًا لابد أن تقل طاقته الداخلية** ، وذلك لأن الشغل يبذل عندئذ على حساب الطاقة الداخلية . أما إذا كان الشغل الأدياباتى مبذولاً على النظام فإن الطاقة الداخلية تزداد فى هذه الحالة . هذا وسوف نتعرف فى المثال التوضيحى 12-3 والمثال 12-1 على استخدامين عمليين للعمليات الأدياباتية . أما الآن فإننا سنناقش السلوك الأدياباتى للغاز المثالى ببعض التفصيل .

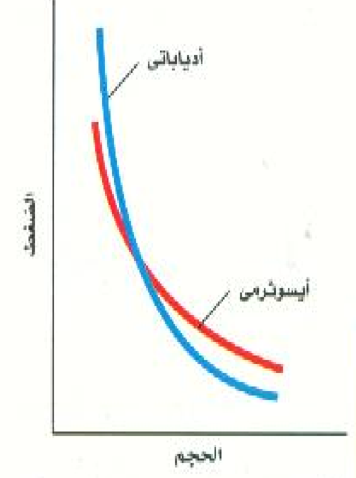
فى حالة الغاز المثالى لا توصف العملية الأدياباتية بدلالة القانون $PV = nRT$ وحده لأن متغيرات الحالة الثلاثة (P, V, T) تتغير جميعها أثناء العملية . ومن ثم تلزمنا معادلة أخرى بين نفس هذه المتغيرات فى حالة العمليات الأدياباتية . ويمكن استنتاج هذه المعادلة بملاحظة أن الشغل المبذول على الغاز يستغل بأكمله فى زيادة الطاقة الداخلية . وهذه الزيادة فى الطاقة الداخلية تسبب بدورها تغير درجة حرارة الغاز . ولكن نفس هذا التغير فى درجة الحرارة يمكن أن يتحقق بإضافة الطاقة إلى النظام . ومن ثم فإنه من الممكن إيجاد علاقة بين كمية الحرارة والتغير فى درجة الحرارة والشغل حتى فى حالة العملية الأدياباتية . وفى حالة الغاز المثالى سوف يؤدى بنا هذا الأسلوب فى التفكير إلى النتيجة الآتية :

إذا تغيرت حالة غاز مثالى بعملية أدياباتية من P_1, V_1, T_1 إلى P_2, V_2, T_2 فإن :

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma} \qquad (12\text{–}11)$$

حيث $\gamma = C_P / C_V$ للغاز .

ويمكن كتابة هذه العلاقة الأدياباتية على الصورة $P = \text{constant} / V^{\gamma}$. وحيث أن $\gamma > 1$ دائمًا ، فإن P يقل بزيادة V فى العملية الأدياباتية بمعدل أسرع مما فى العملية الأيسوثرمية $P = \text{constant} / V$ ؛ وهذا موضح بالشكل 12-7 .



شكل 12-7:
مقارنة بين التغير الأدياباتى والتغير الايسوثرمى .

مثال 12-1 :

فى أسطوانة محرك الديزل يضغط الهواء فجأة (ومن ثم أدياباتيًا) بواسطة الكباس ، وتؤدى هذه العملية إلى ارتفاع درجة حرارته . وتكون درجة الحرارة الجديدة عالية بدرجة كافية لإشعال الوقود المحقون دون الحاجة إلى استعمال شمعات الإشعال . لنفرض

أن الكباس يضغط الهواء بحيث يصبح حجمه النهائى جزءًا واحدًا من خمسة عشرة جزء من قيمته الابتدائية . فإذا كان الضغط الابتدائى $P_1 = 1.0\ \text{atm}$ ودرجة الحرارة الابتدائية $T_1 = 27.0°C$ ، أوجد الضغط P_2 ودرجة الحرارة T_2 النهائيتين .

استدلال منطقى :

سؤال : هل يمكن استخدام قانون الغاز المثالى ؟

الإجابة : نعم ، ولكن سيكون لدينا مجهولان هما P_2 ، T_2 . ومن ثم فإننا نحتاج إلى علاقة ثانية ، علاقة تعتمد على العملية التى تتغير بها حالة الغاز .

سؤال : ما هو الشرط الذى ينطبق على العملية الأدياباتية ؟

الإجابة : $PV^{\gamma} = \text{constant}$ ، وبذلك يمكننا كتابة :

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

لاحظ أن P_2 هو المجهول الوحيد فى هذه المعادلة لأن النسبة بين الحجمين النهائى والابتدائى معطاة بالمسألة $(V_2 = V_1/15)$. وبالرجوع إلى الجدول 1–12 نجد أن $\gamma = 1.40$ لكل من O_2 و N_2 ، وهما الغازان المكونان للهواء فى الأسطوانة . وبناء على ذلك يمكننا كتابة :

$$P_2 = P_1\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma} = (1.00\ \text{atm})\left(\frac{15}{1}\right)^{1.40}$$

سؤال : كيف يمكن استخدام قانون الغاز المثالى لإيجاد T_2 بعد تعيين P_2 ؟ أليس عدد المولات n مجهولاً ؟

الإجابة : أبسط طريقة للخروج من هذا المأزق هى استخدام قانون الغاز المثالى فى صورة نسبة كما يلى :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1}$$

سؤال : بأى وحدات يجب التعبير عن درجتى الحرارة فى هذه العلاقة ؟

الإجابة : يجب دائمًا أن تكون درجة الحرارة فى قانون الغاز المثالى هى درجة الحرارة المطلقة .

الحل والمناقشة : يجب استخدام آلة حاسبة تحتوى على المفتاح x^y . لحساب $(15)^{1.4}$ إدخل 15 واضغط المفتاح x^y ثم إدخل 1.4 واضغط المفتاح = ، وعندئذ ستحصل على 44.3 . إذن :

$$P_2 = (44.3)P_1 = 44.3\ \text{atm} = 4.48 \times 10^6\ \text{Pa}$$

وباستخدام هذه القيمة لحساب T_2 نحصل على :

$$T_2 = T_1\ \frac{44.3}{1}\ \frac{1}{15} = 2.95\ (T_1) = 2.95(300\ \text{K}) = 886\ \text{K} = 613°\text{C}$$

وهذه درجة حرارة عالية بدرجة كافية لإشعال خليط الوقود والهواء .

تمرين : ماذا ستكون قيمة الضغط النهائي إذا ضغط الغاز أيسوثرميًا إلى حجم قدره 1/15 من حجمه الابتدائي ؟ **الإجابة** : 15 atm .

جدول 2-12 : ملخص للعمليات الديناميكية الحرارية (في حالة الغاز المثالي أحادي الذرة)

العملية	الثابت	الانتقال الحراري (Q)	الشغل المبذول (W)	التغير في الطاقة الداخلية (ΔU)	شكل القانون الأول
أيسوبارية	P(or V/T)	$nC_P\Delta T$	$P\Delta V$	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$Q = \Delta U + P\Delta V$
ثابتة الحجم (أو أيسوكورية)	V(or T/P)	$nC_V\Delta T = \frac{3}{2}nR\Delta T$	0	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$Q = \Delta U$
أيسوثرمية	T(or PV)	$nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$	$nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$	0	$Q = W$
أدياباتية	PV^{γ}	0	$-\frac{3}{2}nR\Delta T$	$\frac{3}{2}nR\Delta T$	$\Delta U = -W$

12-7 تطبيقات القانون الأول

ينطبق القانون الأول على جميع العمليات الديناميكية الحرارية الممكنة ، والتي تربط الكميات الثلاث Q و W و ΔU . ولقد ناقشنا أربعة عمليات للغازات المثالية يمكن فيها حساب هذه الكميات الثلاث بسهولة ، ويمثل الجدول 2-12 تلخيصًا لنتائج هذه الحسابات . ويتمثل أحد أهدافنا في هذه الدراسة في اكتساب القدرة على حساب Q و W و ΔU لأية عملية قد نتعامل معها . فإذا أمكننا إيجاد أي **اثنتين** منها يمكن حساب الكمية الثالثة الباقية . أما إذا أعطى لنا وصف العملية في صورة مسار مثل AB في الرسم البياني PV فعلينا اتباع الآتي :

1 ـ يمكن إيجاد الشغل (W_{AB}) دائمًا بتعيين المساحة الواقعة تحت المسار AB . وإذا كان AB مكونًا من خطوط مستقيمة ، فإن هذه الخطوة تؤول إلى حساب مساحات مثلثات أو مستطيلات . أما إذا كان AB مسارًا منحنيًا فيمكن رسم المنحنى على ورقة رسم بياني ثم عد المربعات تحت المنحنى .

2 ـ في حالة الغازات المثالية ، يمكن إيجاد درجة حرارة أي حالة (أي نقطة في الرسم البياني PV) من قانون الغاز المثالي ، أي يمكن حساب T_A و T_B . وحيث أن الطاقة الداخلية **لا تعتمد على العملية التي تتغير بها الحالة ، بل تعتمد فقط على درجتي الحرارة عند النقطتين A و B** ، يمكننا حساب ΔU من المعادلة (3-12) :

$$\Delta U = \frac{3}{2}nR(T_B - T_A) \quad \text{(للغاز أحادي الغاز)}$$

3 ـ يمكن استخدام القانون الأول (المعادلة 1-12) . عندئذ لتعيين الحرارة المنتقلة من أو إلى الغاز أثناء العملية ، Q_{AB} :

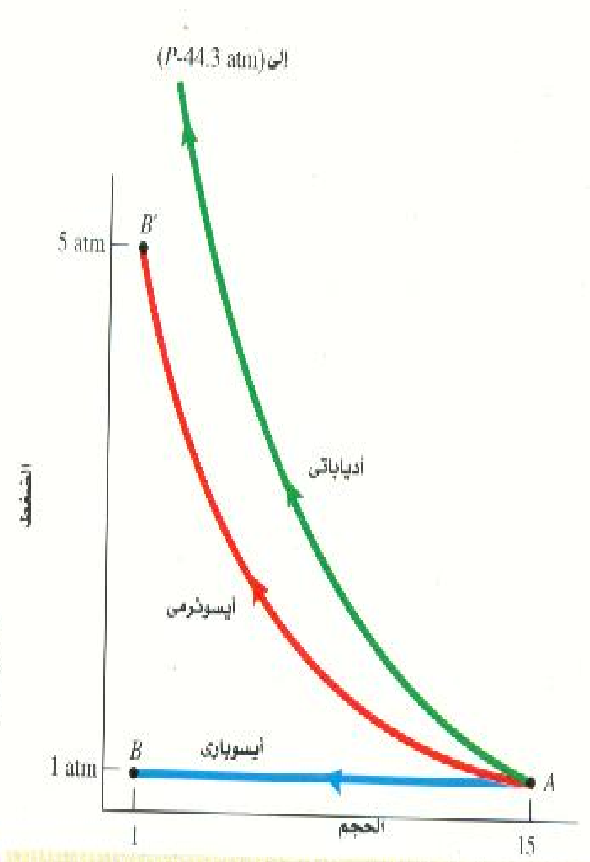
$$Q_{AB} = \Delta U + W_{AB}$$

ويجب أن نتذكر دائمًا استخدام الإشارة الصحيحة بكل من Q و W وتكون الإشارة موجبة إذا كانت الحرارة **مضافة إلى** الغاز وكان الشغل **مبذولاً بواسطة** الغاز (تمدد) . أما الإشارة السالبة فتستخدم عندما تكون الحرارة **مفقودة** بواسطة الغاز وعندما يكون الشغل **مبذولاً على** الغاز (انضغاط) .

لنتعرف الآن على طريقة تطبيق هذه القواعد فى بعض الأمثلة .

مثال 12-2 :

افترض أن لدينا 1 mol من غاز مثالى أحادى الذرة عند $P_1 = 1$ atm ، $T_1 = 27°C$. احسب كلاً من Q و W و ΔU فى الحالات الآتية : (أ) الانضغاط الأدياباتى ، (ب) الانضغاط الأيسوثرمى ، (جـ) الانضغاط الأيزوبارى ؛ بفرض أن الحجم النهائى فى كل حالة خمس الحجم الابتدائى . هذه العمليات الثلاث موضحة بالشكل 8-12 .



شكل 8-12:
ثلاثة انضغاطات من نفس الحالة الابتدائية إلى نفس الحجم النهائى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى أسهل كمية يمكن أن نبدأ بها ؟

الإجابة : يمكن حساب ΔU إذا علمنا درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية . ويمكن أيضًا حساب الشغل إما باستخدام المعادلة الرياضية الخاصة بذلك أو بإيجاد المساحة تحت المسار فى الرسم البيانى PV . وبتطبيق القانون الأول يمكن بعدئذ تعيين Q .

سؤال : ما هو التعبير الرياضى للتغير فى الطاقة الداخلية ΔU ؟

الإجابة : $\Delta U = \frac{3}{2}nR(T_2 - T_1)$ للغاز المثالى فى كل الحالات .

سؤال : ما هى درجة الحرارة النهائية فى كل من الحالات الثلاث ؟

الإجابة :

(أ) ارجع إلى حسابات العملية الأدياباتية فى المثال 1-12 ، مع ملاحظة أن مثالنا الحالى يختص بغاز أحادى الذرة ، حيث $\gamma = 1.67$ (من الجدول 1-12) . وبناء على ذلك سنجد أن :

$$P_2 = P_1\left(\frac{5}{1}\right)^{1.67} = (1\text{ atm})(14.7) = 14.7\text{ atm}$$

ومنه :

$$T_2 = T_1\frac{P_2}{P_1}\frac{V_2}{V_1} = (14.7)\left(\frac{1}{5}\right) = 2.94\,T_1 = 882\text{ K}$$ (للانضغاط الأدياباتى)

(ب) فى الحالة الأيسوثرمية :

$$T_2 = T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{ K}$$ (للانضغاط الأيسوثرمى)

(جـ) فى الحالة الأيسوبارية T تتناسب مع V ، لأن P ثابت . إذن ، إذا كان $V_2 = V_1/5$ ، فإن :

$$T_2 = \frac{T_1}{5} = 60\text{ K}$$ (للانضغاط الأيزوبارى)

سؤال : ما قيمة التغير فى الطاقة الداخلية فى كل حالة ؟

الإجابة :

(أ) للانضغاط الأدياباتى :

$$\Delta U = \frac{3}{2}\,nR\Delta T$$

$$= \frac{3}{2}\,(1\text{ mol})(8.314\text{ J/mol.K})\,(882\text{ K} - 300\text{ K}) = +7260\text{ J}$$

(ب) للانضغاط الأيسوثرمى : $\Delta U = 0$ لأن $\Delta T = 0$.

(جـ) للانضغاط الأيسوبارى :

$$\Delta U = = \frac{3}{2}\,(1\text{ mol})(8.314\text{ J/mol.K})\,(20\text{ K} - 300\text{ K}) = -3490\text{ J}$$

سؤال : ما هى المعادلات التى تعطى الشغل المبذول فى كل حالة ؟

الإجابة : من الجدول 2-12 نجد أن :

(أ) $W = -\Delta U = -7260\text{ J}$ (للانضغاط الأدياباتى)

(ب) $W = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$ (للانضغاط الأيسوثرمى)

$$= (1)\,(8.314\text{ J/mol.K})\,(300\text{ K})\ln\left(\frac{1}{5}\right) = -4010\text{ J}$$

(جـ) $W = P(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1)$ (للانضغاط الأيسوبارى)

$= (1)\,(8.314\ J/mol.K)\,(20\ K - 300K) = -2330\ J$

سؤال : ما هى معادلات الانتقال الحرارى ؟

الإجابة :

(أ) $Q = 0$ (للانضغاط الأدياباتى)

(ب) $Q = W = -4010\ J$ (للانضغاط الأيسوثرمى)

(جـ) $Q = \Delta U + W$ (للانضغاط الأيسوبارى) (للانضغاط الأيسوبارى)

$= \Delta U + P\Delta V = \Delta U + nR\Delta T$

$= -3490\ J + (-2330\ J) = -5820\ J$

الحل والمناقشة : لاحظ النقاط الهامة الآتية :

1 الإشارة السالبة تدل على أن الشغل مبذول على الغاز فى جميع الحالات الثلاث ، وهذا متوقع لأى نوع من الانضغاط .

2 فى الحالة الأدياباتية يستهلك الشغل بأكمله فى زيادة الطاقة الداخلية .

3 لكى تظل درجة الحرارة ثابتة فى الحالة الأيسوثرمية يجب أن يفقد الغاز كمية من الحرارة تساوى الشغل المبذول على الغاز .

4 تأكد أن كمية الحرارة المفقودة فى الحالة الأيسوبارية تساوى كمية الحرارة المعطاة بالعلاقة $Q = nC_P\Delta T$.

مثال 12-3 :

أجريت العملية الديناميكية الحرارية ABC الموضحة بالشكل 9-12 على كمية من غاز الأرجون قدرها 2 mol . عين التغير فى الطاقة الداخلية والشغل المبذول وكمية الحرارة المنتقلة خلال هذه العملية .

استدلال منطقى :

1

سؤال : هل العملية ABC أى من العمليات الأربع السابق مناقشتها ؟

الإجابة : لا ، إذ أن أيا من المعادلات السابقة التى تعطى Q أو W لا تنطبق على هذه العملية .

سؤال : كيف يمكن تعيين الشغل المبذول ؟

الإجابة : الشغل هو المساحة المحصورة تحت العملية فى الرسم البيانى PV دائمًا .

سؤال : ما هى المساحة المحصورة تحت المسار ABC ؟

الإجابة : المساحة الكلية تساوى مساحة المثلث الأخضر ABC زائد مساحة المستطيل الأحمر تحت الخط AC .

$$\text{المساحة} = W = \frac{1}{2}(0.250 \text{ atm})(50.0 \text{ liters}) + (0.500 \text{ atm})(50.0 \text{ litres})$$

سؤال : كيف نعلم ما إذا كان الشغل مبذولاً بواسطة الغاز أو على الغاز .

الإجابة : بملاحظة ما إذا كانت العملية عملية انضغاط ($\Delta V < 0$) أو تمدد ($\Delta V > 0$) . ويلاحظ أن الغاز يتمدد في هذه الحالة ، أي أنه يبذل شغلاً ومن ثم فإن المساحة المحسوبة تمثل شغلاً موجبًا .

سؤال : وبما أن هذه العملية ليست بسيطة ، كيف يمكن حساب ΔU ؟

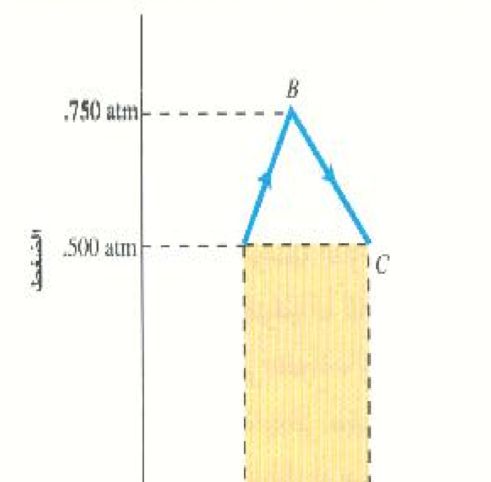
الإجابة : التغير في الطاقة الداخلية ΔU لا يعتمد على نوع العملية ، إذ أنه يساوي دائمًا $\frac{3}{2}nR\Delta T$ في حالة الغاز المثالي .

سؤال : كيف تحسب درجتا الحرارة عند النقطتين A و C ؟

الإجابة : باستخدام قانون الغاز المثالي : $T = PV/nR$.

سؤال : ما هي العلاقة الممكن استخدامها لتعيين Q_{ABC} ؟

الإجابة : بعد إيجاد W و ΔU يمكن استخدام القانون الأول للديناميكا الحرارية لحساب Q ، إذ أن : $Q = \Delta U + W$.



شكل 9-12:
العملية الديناميكية الحرارية ABC في المثال 3-12 .

الحل والمناقشة : بحساب المساحة تحت المسار ABC نحصل على :

$$W = +31.2 \text{ atm . liter} = +3160 \text{ J}$$

درجة الحرارة عند النقطة A هي :

$$T_A = \frac{P_A V_A}{nR} = \frac{(0.500 \text{ atm})(40.0 \text{ liter})}{(2.00 \text{ mol})(0.0820 \text{ atm liter/mol.K})}$$

$$= 122 \text{ K}$$

(لاحظ اختيار R بالوحدات المناسبة) . وحيث أن $P_A = P_C$ ، إذن :

$$T_C = T_A \frac{V_C}{V_A} = (122 \text{ K}) \frac{90.0}{40.0} = 274 \text{ K}$$

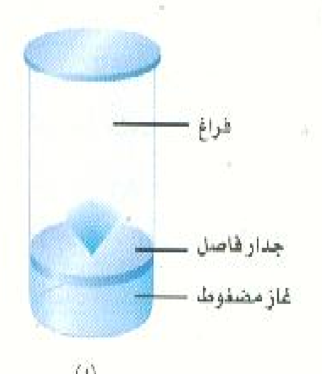
إذن :

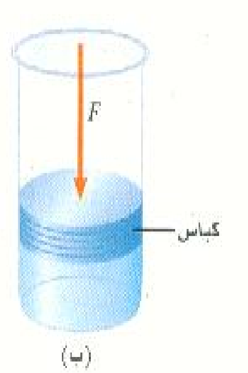
$$\Delta U = \frac{3}{2}(2.00\ \text{mol})(8.314\ \text{J/mol.K})(274\ \text{K} - 122\ \text{K}) = +3790\ \text{J}$$

وطبقًا للقانون الأول فإن كمية الحرارة المنتقلة تساوى ΔU و W :

$$Q = +3790\ \text{J} + 3160\ \text{J} = +6950\ \text{J}$$

وهذه هى كمية الحرارة المضافة إلى الغاز أثناء العملية .





شكل 10–12:
عندما يثقب الفاصل بين الغرفتين ثقبًا صغيرًا فى الجزء (أ) سوف يتمدد الغاز فى الفراغ . فى الجزء (ب) استبدل الفاصل بكباس قابل للحركة . فى هذه الحالة سوف يرتفع الكباس إلى أعلى أثناء تمدد الغاز . فى أية حالة يكون تبريد الغاز أكبر ؟

عملية تخفيف الضغط بالخنق

مثال توضيحى 3 -12

يمثل الشكل 10–12 أ إناء معزولاً مقسمًا إلى قسمين يحتوى أحدهما ، وهو الجزء السفلى الصغير ، على غاز تحت ضغط عال ، أما الجزء العلوى الأكبر حجمًا فهو مفرغ تمامًا . ثقبت فتحة صغيرة فى الجدار الموصل بين الجزئين بحيث يتمدد الغاز أدياباتيًا فى الغرفة المفرغة (أ) صف التغير الناتج فى درجة حرارة الغاز . (ب) افترض أن القسم السفلى الصغير مملوء بدلاً من ذلك بسائل تحت ضغط عال يمكنه أن يتبخر عند تمدده فى الفراغ . صف تغير درجة حرارة المادة .

استدلال منطقى : تسمى مثل هذه العملية التى يتمدد فيها الغاز خلال فتحة صغيرة أو قرص مسامى ، عملية **تخفيف الضغط بالخنق** . وحيث أن هذه العملية أدياباتية ، فإن القانون الأول يعنى أن $\Delta U = -W$ ، حيث W هو الشغل المبذول بواسطة الغاز .

(أ) المطلوب هو معالجة حالة غاز يمر بهذه العملية ، وسنفترض أنه غاز مثالى . يمكننا عندئذ القول أن الغاز المثالى لا يبذل شغلاً أثناء تمدده فى الفراغ ، وذلك لأن الضغط الذى يقاوم التمدد يساوى صفرًا . إذن $P\Delta V = 0$. وهذا يعنى طبقًا للقانون الأول أن الطاقة الداخلية للغاز لا تتغير . وحيث أن $U \sim T$ ، **فإن درجة حرارة الغاز تظل ثابتة** .

(ب) سوف تختلف النتيجة اختلافًا كبيرًا إذا كانت المادة المضغوطة سائلاً من السوائل التى تتبخر عند تمددها فى الفراغ ، كالبيوتان أو الفريون . فحيث أن طور المادة يتغير أثناء العملية من سائل إلى بخار ، إذن لابد أن يستمد السائل حرارة التبخير من أى مصدر متاح للطاقة . ونظرًا لأن العملية أدياباتية فإن السائل لا يمكن أن يستمد الطاقة اللازمة للتبخير من الخارج ، ومن ثم فإن حرارة تبخير كتلة قدرها m من السائل لابد أن تستمد من الطاقة الداخلية للسائل $\Delta U = -mL_V$. ويترتب على ذلك أن يقل متوسط طاقة حركة الجزيئات أثناء التمدد ، وعليه فإن درجة حرارة الغاز تصبح أقل من درجة حرارة السائل الأصلى . وهذا يشبه إلى حد كبير عملية التبريد التى تحدث أثناء التبخير .

ومن أشهر الأمثلة المتعلقة بهذه الظاهرة ما يشاهد عند استعمال علب رش الإيروسولات التى تحتوى على سائل تحت ضغط عال . ولعلك تكون قد لاحظت عند

ضغط صمام مثل هذه العلبة ، لكى يسمح لمحتوياتها بالتبخر ، أن الصمام والعلبة يبردان إلى درجة ملحوظة . وبالرغم من أن التمدد يحدث فى هذه الحالة ضد الضغط الجوى وليس فى الفراغ ، فإن تأثير التبريد الناتج عن تغير الحال يكون كبيرًا جدًا . والواقع أن عملية تخفيف الضغط بالخنق ؛ مع استعمال مواد ذات حرارة تبخير عالية جدًا ، هى أساس عمل جميع أجهزة التبريد ، بما فى ذلك أجهزة تكييف الهواء والثلاجات والمجمدات المنزلية . هذا وسوف نتناول مناقشة مثل هذه الأجهزة بتفصيل أكبر فى الفصل التالى .

وأخيرًا فإن الغاز المثالى ذاته يمكن أن يبرد أثناء التمدد الأدياباتى فى حالات معينة . فمثلاً ، لنفرض أننا استعضنا عن الفاصل بين الغرفتين العلوية والسفلية فى الشكل 12-10 أ بكباس قابل للحركة ، كما هو مبين بالشكل 12-10 ب . فإذا كان القسم العلوى من الإناء يحتوى على هواء عند ضغط أقل من الضغط فى القسم السفلى ، فإن الغاز المتمدد يجب أن يبذل شغلاً ضد هذا الضغط . وطالما كان التمدد أدياباتيًا ، فإن الغاز سوف يبذل هذا الشغل على حساب الطاقة الداخلية للغاز ، مما يؤدى إلى انخفاض درجة حرارته . ■

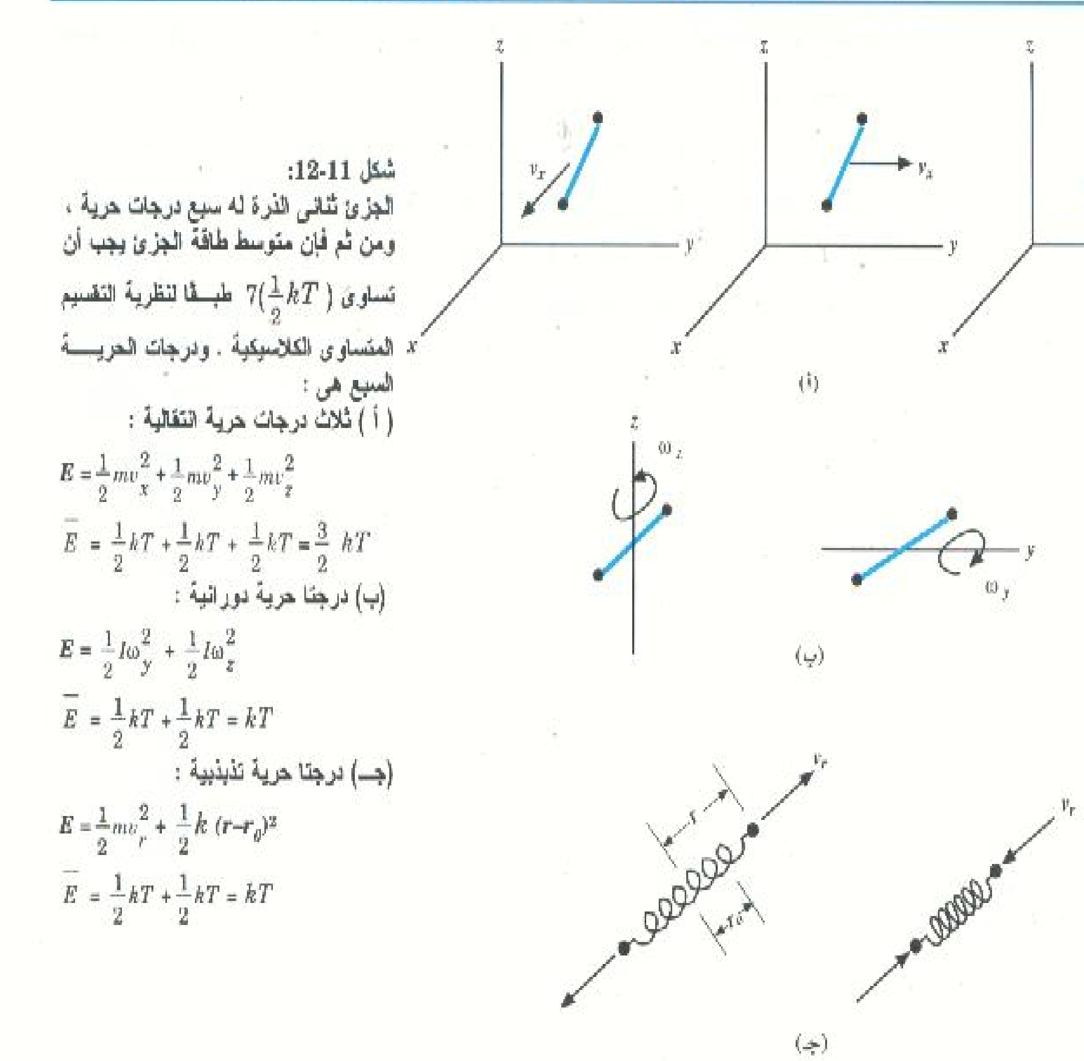
12-8 وجهة نظر حديثة :

اعتماد الحرارتين النوعيتين الجزيئتين للغازات على درجة الحرارة

لاحظنا فى القسم 12-5 أن القيم المقاسة لكل من C_V و C_p للغازات المثالية أحادية الذرة تتفق اتفاقًا جيدًا مع النظرية الكلاسيكية ، كما وجدنا أن النظرية الكلاسيكية لا تتنبأ بأى تغير للحرارتين النوعيتين للغازات المثالية ، سواء كانت أحادية الذرة أما لا ، مع درجة الحرارة . ومع ذلك فقد أثبتت التجربة أن الحرارتين النوعيتين للغازات ثنائية الذرة وعديدة الذرات تعتمد بالفعل على درجة الحرارة ، وأن قيمهما عند درجات الحرارة المنخفضة والمتوسطة لا تتفق مع التنبؤات الكلاسيكية . ولفهم أسباب هذا التناقض علينا أن نلجأ مرة أخرى إلى مفهوم الطاقة التكمية ، وهو الموضوع السابق مناقشته فى القسم 8-5 .

المبدأ الأساسى للاتزان الحرارى هو أن كلاً من مركبات الحركة ، فى الاتجاهات x و y و z ، تساهم بنصيب متساو فى الطاقة الداخلية للغاز ؛ وهذا ما يسمى نظرية **التقسيم المتساوى** للطاقة . وهكذا فإن كلاً من مركبات الحركة الانتقالية للذرة تساهم فى طاقة الحركة الانتقالية $(3kT/2)$ بمقدار الثلث ، أى $\frac{1}{2}kT$ فى المتوسط ؛ وسوف نسمى هذه المركبات المستقلة للحركة **بدرجات حرية الغاز** . ومعنى ذلك أن الغاز أحادى الذرة له 3 درجات حرية ، واحدة لكل من مركبات متجه سرعته الثلاث .

ولمعالجة الغازات الجزيئية فإننا سنقوم بتعميم نظرية التقسيم المتساوى على جميع الحركات المستقلة (درجات الحرية) التى تساهم فى طاقة الجزئ . فالجزيئات الخطية ثنائية الذرة كجزئ الهيدروجين H_2 يمكنها الدوران حول محورين مستقلين متعامدين



شكل 11-12:
الجزئ ثنائى الذرة له سبع درجات حرية ، ومن ثم فإن متوسط طاقة الجزئ يجب أن تساوى ($7(\frac{1}{2}kT$ طبقًا لنظرية التقسيم المتساوى الكلاسيكية . ودرجات الحرية السبع هى :

(أ) ثلاث درجات حرية انتقالية :

$$E = \frac{1}{2}mv_x^2 + \frac{1}{2}mv_y^2 + \frac{1}{2}mv_z^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = \frac{3}{2}\ kT$$

(ب) درجتا حرية دورانية :

$$E = \frac{1}{2}I\omega_y^2 + \frac{1}{2}I\omega_z^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT$$

(جـ) درجتا حرية تذبذبية :

$$E = \frac{1}{2}mv_r^2 + \frac{1}{2}k\ (r-r_0)^2$$

$$\overline{E} = \frac{1}{2}kT + \frac{1}{2}kT = kT$$

مع الخط الواصل بين الذرتين ، وطبقًا لنظرية التقسيم التساوى فإن متوسط الطاقة المرتبطة بكل درجة حرية دورانية تساوى $\frac{1}{2}kT$. وعلاوة على ذلك فإن تذبذب الرابطة بين الذرتين يعنى أن للجزئ طاقة حركة وطاقة وضع . ومرة ثانية تتنبأ نظرية التقسيم المتساوى أن متوسط كل من طاقة حركة الجزئ وطاقة وضعه تساوى $\frac{1}{2}kT$. وبناء على ذلك يمكننا القول أن النظرية الكلاسيكية تتنبأ بأن الطاقة الداخلية للجزيئات الخطية ثنائية الذرة تساوى $7\left(\frac{1}{2}kT\right)$ لكل جزئ فى المتوسط (انظر الشكل 11-12) ؛ إذن فى حالة n moles :

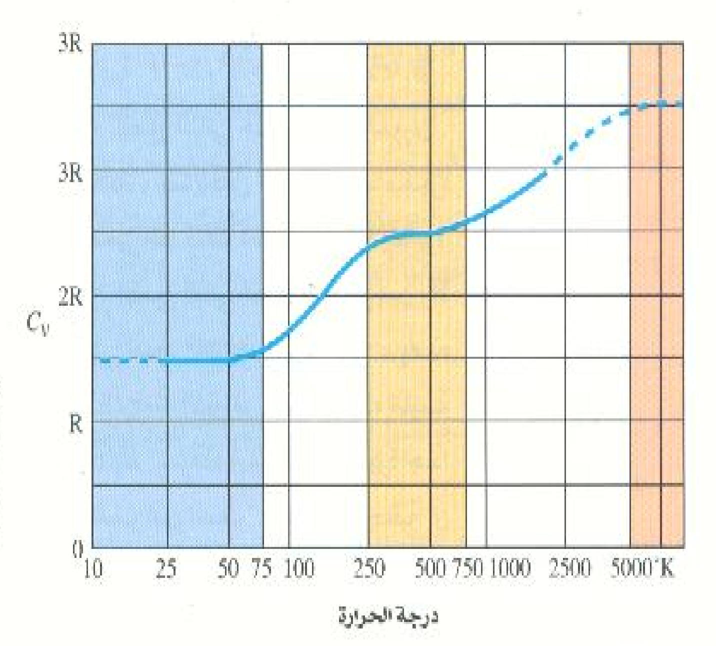
$$U = \frac{7}{2}nRT = nC_VT$$

ومنه :

$$C_V = \frac{7}{2}R \qquad \text{و} \qquad C_P = C_V + R = \frac{9}{2}R$$

الآن يمكننا تفسير معنى الرمز K المستخدم فى القسم 12-5 ، حيث كتبنا التعبير العام للحرارة النوعية C_V على الصورة $C_V = K(R/2)$ والنسبة γ على الصورة

$\gamma = C_P / C_V = (K + 2)K$. من الواضح إذن أن العدد الصحيح K هو عدد درجات حرية الغاز المتاحة للمشاركة فى الطاقة الحرارية . ففى حالة الغازات أحادية الذرة $K = 3$ ، $\gamma = 5/3 = 1.67$ ، وهذا يتفق مع التجربة . أما بالنسبة للغازات ثنائية الذرة فإن النظرية الكلاسيكية تتنبأ بأن $K = 7$ ، $\gamma = 9/7 = 1.28$ ، ولكن ثبت بالتجربة العلمية أن $\gamma = 1.4$ (الجدول 12-1) لمعظم الغازات ثنائية الذرة ، وهذا يشير إلى أن عدد درجات الحرية خمسة فقط $(K = 5)$. وبالرغم من أن نتائج النظرية الكلاسيكية لا توضح أن اعتماد الحرارتين النوعيتين على درجة الحرارة ، فإن القيمة العملية المقاسة لكل من C_V و C_P تؤكد أنهما تعتمدان على درجة الحرارة فى حالة الغازات الجزيئية .



شكل 12-12:
القيم العملية للحرارة النوعية C_V لغاز الهيدروجين ثنائى الذرة كدالة فى درجة الحرارة . لاحظ التدريج اللوغاريتمى لمحورى الإحداثيات .

لنناقش الآن النتائج العملية لغاز مكون من جزيئات الهيدروجين H_2 . يبين الشكل 12-12 أن C_V لغاز الهيدروجين H_2 عن درجات الحرارة التى تقل عن حوالى 50 K ثابتة وتساوى $(3/2R)$ كما فى حالة الغازات أحادية الذرة ، وتكون $(C_V = 5/2\,R)$ فوق درجة 250 K إلى حوالى 750 K . وأخيرًا تقترب C_V من قيمتها الكلاسيكية $(7/2\,R)$ عند درجات الحرارة التى تزيد عن 5000 K ويستنتج من هذا السلوك أن أنماط الطاقة الدورانية والتذبذبية لا تكون موجودة بالمرة عند درجات الحرارة المنخفضة جدًا (50 K) ، وأن اثنان فقط من هذه الأنماط ينشطان فى مدى درجات الحرارة المتوسطة . أما من وجهة النظر الكلاسيكية فإن مبدأ التوزيع المتساوى للطاقة يعنى ضمنيًا أن التصادمات الجزيئية تعمل على توزيع الطاقة الداخلية توزيعًا متساويًا بين جميع درجات الحرية لا يعتمد على درجة الحرارة .

ظل سلوك C_V الذى يتناقض تناقضًا واضحًا مع النظرية الكلاسيكية لغزًا محيرًا إلى أن استطاع أينشتين تفسيره فى عام 1907 . ومرة أخرى فإن تفسير هذا السلوك يتطلب مراجعة الفروض الأساسية للنظرية الكلاسيكية . رأينا سابقًا (القسم 5-8) أن النظرية الكلاسيكية تفترض أنه ليس هناك أى حدود « لمدى صغر » كمية التحرك الزاوى للجسم

الدائر ، وقد رأينا أيضًا أن هذا الفرض يجب نبذه تمامًا فى حالة الأجسام ذات الأبعاد الذرية . ذلك أن خبرتنا مع الأجسام الماكروسكوبية الدائرة لا تدل إطلاقًا على أن هذا الفرض قد يكون موضع شك . فعجلة السيارة مثلاً يمكنها أن تدور بمعدل أبطأ فأبطأ وبصورة ملساء مستمرة أثناء تقاصر السيارة إلى أن تتوقف تمامًا . وبالمثل ، فليس هناك فى خبرتنا مع الأنظمة المتذبذبة ، كالزنبرك والبندول ، ما يحملنا على الاعتقاد بأن هناك حدًا يختلف عن الصفر فيما يتعلق بالتردد الأدنى الممكن للتذبذب . ومن الغريب حقًا أن أكثر الفروض « وضوحًا » تكون هى الأصعب اختبارًا فى معظم الأحيان .

ذكرنا كذلك فى القسم 5–8 أن كمية التحرك الزاوى للأجسام الدائرة فائقة الصغر ظاهرة تكمية ، وأن كم كمية التحرك الزاوى يساوى $(L_1 = h/2\pi)$. هذا يعنى أن الطاقة الدورانية الدنيا لمثل هذه الأجسام تعطى بالعلاقة $E_1(\text{rot}) = L_1^2 2I = h^2/8\pi^2 I$. حيث h ثابت بلانك $(6.62 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$ و I عزم القصور الذاتى حول محور الدوران . لاحظ أن ثابت بلانك h يظهر مربعًا فى هذه العلاقة ، مما يجعل قيمة البسط صغيرة جدًا . ومع ذلك فإن عزم القصور الذاتى للجزيئات صغير جدًا كذلك لأنه يتضمن كتلاً صغيرة جدًا ومسافات صغيرة جدًا بين الذرات . فمثلاً ، عزم القصور الذاتى لجزئ الهيدروجين H_2 حول محور عمودى على الرابطة بين الذرتين H فى حدود $I \approx 10^{-47}\ \text{kg m}^2$ ، وهذه قيمة متناهية الصغر بالمقاييس الماكروسكوبية . ولذلك فعند التعويض عن I بهذه القيمة فى معادلة $E_1(\text{rot})$ سنحصل على $E_1(\text{rot}) \approx 10^{-21}\ \text{J}$ ، وهذه أيضًا كمية صغيرة جدًا بالمقياس الماكروسكوبى بحيث لا نحس أنها تختلف عن الصفر . ولكن بملاحظة أن ثابت بولتزمان ، الذى يحدد كمية الطاقة الحرارية المتاحة لكل درجة حرية ، أصغر كثيرًا من ذلك (فى حدود $10^{-23}\ \text{J/k}$) ، يمكننا أن نجد من هذا المنظور أن كم الطاقة الدورانية لجزئ H_2 يبدو كبيرًا حقًا ، ويساوى kT تقريبًا عندما $T = 100\ \text{K}$.

وفى عام 1907 افترض أينشتين أن الطاقات الممكنة لجزئ متذبذب يمكن أن تكون تكمية أيضًا ، بمعنى أن الطاقات التذبذبية لا يمكن أن تكون صغيرة بلا حدود ، بل إنها تساوى مضاعفات لكمية أساسية من الطاقة لا يمكن تقسيمها . كذلك افترض أينشتين أن كم الطاقة التذبذبية يتناسب مع تردد التذبذب f وأن ثابت التناسب يساوى ثابت بلانك . ويمكن التعبير عن ذلك رياضيًا بالمعادلة $E_{osc} = n(hf)$ ، حيث n عدد صحيح و $(h = 6.62 \times 10^{-34}\ \text{J.s})$ (أو J/Hz) مرة ثانية . وطبقًا لهذه الفكرة فإن **طاقة التذبذب لا يمكن أن تكون أصغر من** $E_1(vib) = hf$. وفى حالة التذبذبات الماكروسكوبية الكبيرة تكون الترددات من الصغر بحيث تصبح hf كمًا صغيرًا جدًا . أى أنه يمثل كمية متناهية الصغر من الطاقة يستحيل قياسها . أما فى حالة الاهتزازات الجزيئية ذات الترددات العالية جدًا فإن الكمية hf تمثل « كتلة كبيرة » من الطاقة على هذا المقياس .

لنحاول الآن أن نرى كيف يمكن تفسير سلوك الحرارتين النوعيتين باستخدام مفهوم كمات الطاقة الدورانية والاهتزازية . ويجب أن نتذكر بداية أن التصادمات بين الجزيئات هى التى تسبب توزيع الطاقة الحرارية توزيعًا إحصائيًا بين أنماط الطاقة

الجزيئية المختلفة ، وأن متوسط الطاقة المتبادلة بين الجزيئات المتصادمة يساوى kT تقريبًا . هذه الطاقة تكون صغيرة جدًا عند درجات الحرارة فائقة الانخفاض . فإذا كانت درجة حرارة الغاز منخفضة جدًا فإن الطاقة المتبادلة فى تصادم متوسط ($=kT$) تكون أصغر من كم الطاقة الدورانية ($h^2/8\pi^2I$) ، وبذلك لن تكون كافية لأن يبدأ الجزئ فى الدوران على الإطلاق . وعليه ، فإذا كانت درجة الحرارة أقل من

$$T_{\text{rot}} = \frac{h^2}{8\pi^2 Ik} \qquad \text{أو} \qquad kT_{\text{rot}} = \frac{h^2}{8\pi^2 I}$$

تقريبًا ، ستكون درجتا الحرة الدورانيتان « متجمدتين » ولن تساهما فى الحرارة النوعية للغاز ؛ ويوضح الجدول 3-12 بعض قيم T_{rot} لاحظ أن T_{rot} لجزئ H_2 تتفق تمامًا مع مناقشتنا السابقة التى قمنا فيها بحساب $E_1(\text{rot})$.

وبالمثل ، عندما تكون درجة حرارة الغاز منخفضة بدرجة كافية لأن تكون الطاقة المتنقلة kT فى تصادم متوسط أقل من الكم hf اللازم لاهتزاز الرابطة بين الذرتين ، فإن التصادمات المتوسطة لن يمكنها « تنشيط » الاهتزازات الجزيئية ، وبذلك لن يشارك النمطان الاهتزازيان للطاقة فى الحرارة النوعية . هذا يعنى إحصائيًا أنه ما لم تصل درجة حرارة الغاز إلى

$$T_{\text{vib}} = \frac{hf}{k} \qquad \text{أو} \qquad kT_{\text{vib}} = hf$$

ستكون درجتا الحرية الاهتزازيتان « متجمدتين » ؛ ويمكن أيضًا أن تجد أمثلة لدرجة الحرارة T_{vib} بالجدول 3-12 .

وتلخيصًا لما سبق نقول أن النظرية الكلاسيكية تفترض أن جميع درجات الحرية الممكنة للطاقة الداخلية تساهم دائمًا بنصيب متساوٍ قدره $(\frac{1}{2}kT)$ فى الطاقة الحرارية . وحيث أن عدد درجات الحرية للغازات المثالية ثنائية الذرة سبعة ، فإن الحرارة النوعية طبقًا للنظرية الكلاسيكية يجب أن تكون $C_V = 7(kT/2)$ بصرف النظر عن درجة الحرارة . أما النظرية الكمية الحديثة فتقتضى وجود « عتبة » لدرجات الحرارة اللازمة لتنشيط أنماط الطاقة التكممية ، وإسهامًا بالتالى فى الحرارة النوعية . ومن جهة أخرى فإن الحركة الانتقالية ليست تكممية ، ولذلك تكون درجات الحرية الانتقالية الثلاث لجميع الغازات نشطة عند أى درجة حرارة أعلى من $T = 0\text{ K}$ ، ولهذا تكون $C_V = \frac{3}{2}R$ لجميع الغازات عند درجات الحرارة فائقة الانخفاض ، وهذا المدى من درجات الحرارة موضح بالجزء الأزرق فى الشكل 12-12 . وعندما تقترب T أكثر فأكثر من T_{rot} ، تزداد تدريجيًا نسبة التصادمات التى يمكنها تنشيط درجتى الحرية الدورانيتين فى الجزيئات ثنائية الذرة ، ولهذا يلاحظ أن السعة الحرارية C_V تتغير تدريجيًا مع درجة الحرارة من $(\frac{3}{2}R)$ إلى $(\frac{5}{2}R)$ ؛ وهذا موضح بالجزء الأصفر فى الشكل 12-12 . وعندما تقترب T من T_{vib} سنجد أن C_V تمر بمنطقة انتقالية أخرى نتيجة للزيادة المطردة فى نسبة التصادمات القادرة على تنشيط الاهتزازات الجزيئية . وبزيادة درجة الحرارة فوق T_{vib} (الجزء الأحمر بالشكل 12-12) تصل الحرارة النوعية للغاز ثنائى

جدول 3-12:
درجات حرارة تنشيط الطاقة الدورانية والاهتزازية للجزيئات ثنائية الذرة .

المادة	T_{vib}(K)	T_{rot}(K)
H_2	6100	85
OH	5400	27
HCl	4300	15
CO	3100	2.8
NO	2750	2.5
O_2	2300	2.1
Cl_2	800	0.35

الذرة إلى $(\frac{7}{2}R)$ مما يوضح أن جميع درجات الحرية السبع تشارك بنصيب متساو فى الطاقة الحرارية . لاحظ أن معظم الغازات المدرجة في الجدول 3-12 لها طاقات دورانية عند درجة حرارة الغرفة ، ولكن ليس لها طاقات اهتزازية على الإطلاق . وعليه فإن العدد الكلى لدرجات الحرية فى هذه الغازات يساوى 5 ، ومن ثم فإن $\gamma = 1.4$.

وهكذا نرى أن السلوك المحير للحرارتين النوعيتين الذى ناقشناه فى بداية هذا الفصل قد أمكن تفسيره بنجاح بوجود كمات متناهية الصغر للطاقة الدورانية والاهتزازية . وبالرغم من أن طاقة الكم الواحد متناهية الصغر ، إلا أن تأثيراتها تنعكس بوضوح على السلوك الماكروسكوبى للمادة . وقد كان هذا نصرًا لميكانيكا « الكم » الجديدة فى البدايات المبكرة للقرن العشرين .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) حالة النظام ، (ب) متغير الحالة ، (جـ) دالة الحالة ، (د) الطاقة الداخلية ، (هـ) الرسم البيانى PV ، (و) الحرارة النوعية الجزيئية (أو المولارية) ، (ز) العمليات الأيسوبارية والأيسوكورية والأدياباتية والأيسوثرمية ، (ح) عملية تخفيف الضغط بالخنق .

2 ـ كتابة القانون الأول فى صورة معادلة رياضية وشرح معنى كل حد فيها ، بما فى ذلك مدلول الإشارات الجبرية .

3 ـ ذكر ما هى الكمية التى تظل ثابتة أثناء كل من العمليات الآتية : (أ) الأدياباتية ، (ب) الأيسوبارية ، (جـ) الأيسوكورية ، (د) الأيسوثرمية .

4 ـ حساب الشغل المبذول بواسطة نظام أثناء أى عملية اختيارية يتغير حجم الغاز نتيجة لها إذا أعطيت الرسم البيانى PV للعملية.

5 ـ حساب التغير فى الطاقة الداخلية لغاز مثالى إذا أعطيت الحالتين الابتدائية والنهائية للغاز .

6 ـ شرح السبب فى أن C_P أكبر دائمًا من C_V للغاز . حساب C_P و γ عندما تكون C_V معلومة . حساب C_V و C_P عندما تكون γ معلومة .

7 ـ تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية لحساب الانتقال الحرارى أثناء تغير الحالة بمعلومية W و ΔU .

8 ـ استخدم القانون الأول للدناميكا الحرارية فى شرح (أ) لماذا يسخن الغاز عند انضغاطه أدياباتيًا ، (ب) لماذا لا تتغير درجة حرارة الغاز أثناء التمدد الحر ، (جـ) لماذا يبرد السائل عادة عندما يمر بعملية تخفيف الضغط بالختق .

9 ـ إيجاد عدد درجات الحرية النشطة فى غاز مثالى بمعلومية C_V أو C_P أو γ .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

متغيرات الحالة الديناميكية الحرارية

متغيرات الحالة الديناميكية الحرارية هى تلك الكميات التى تحدد الحالة الديناميكية الحرارية الماكروسكوبية للنظام . كل مجموعة من قيم هذه المتغيرات تناظر حالة معينة واحدة . متغيرات الحالة للغاز المثالى هى P و V و T .

دوال الحالة الديناميكية الحرارية

دالة الحالة الديناميكية الحرارية هى خاصية تعتمد على متغيرات الحالة فقط . دالة الحالة لها قيمة وحيدة لكل حالة ، وهى لا تعتمد على العملية التى يصل بها النظام إلى هذه الحالة .

الطاقة الداخلية (U)

الطاقة الداخلية لنظام هى مجموع جميع طاقات الحركة والوضع لذراته وجزيئاته . الطاقة الداخلية دالة حالة ديناميكية حرارية .

خلاصة :

1 ـ فى حالة الغازات المثالية أحادية الذرة ، $U = \frac{2}{3} nRT = \frac{3}{2} NkT$.

2 ـ حيث أن الطاقة الداخلية دالة حالة ، إذن يعتمد التغير فى U على الحالتين الابتدائية والنهائية للنظام فقط ، ولكنه لا يعتمد على عملية التغير .

القانون الأول للديناميكا الحرارية

القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لمبدأ بقاء الطاقة يتضمن الانتقال الحرارى إلى النظام أو من النظام :

$$Q = \Delta U + W$$

خلاصة :

1 ـ تعنى إشارة Q الموجبة أن الحرارة مضافة إلى النظام ، إذا كان W موجبًا فذلك يعنى أن الشغل مبذول بواسطة النظام .

2 ـ الشغل الموجب يدل دائمًا على تمدد حجمى للنظام . أما الشغل السالب فيعنى انضغاط النظام ، ويكون الشغل فى هذه الحالة مبذولاً على النظام بواسطة قوة خارجية .

حالات خاصة لتغير الحالة الديناميكية الحرارية

تحدث بعض التغيرات فى الحالة الديناميكية الحرارية للنظام عند ثبوت كمية معينة ما . هذه التغيرات تبسط القانون الأول بطرق مختلفة . وهذه أربعة من مثل هذه التغيرات :

1 ـ تغير أيسوبارى (عند ثبوت الضغط) .

2 ـ تغير أيسوكورى (عند ثبوت الحجم) .

3 ـ تغير أيسوثرمى (عند ثبوت درجة الحرارة) .

4 ـ تغير أدياباتى (لا يوجد أى انتقال حرارى بين النظام والوسط المحيط) .

الخواص المميزة لهذه التغيرات ملخصة فى الجدول 2-12 .

الرسم البيانى PV

الرسم البيانى PV هو منحنى يمثل تغير الضغط مع الحجم للنظام ، وهو يستخدم لتوضيح تغيرات حالة النظام عندما تكون التغيرات الحجمية كبيرة . كل نقطة فى هذا الرسم تمثل حالة ديناميكية حرارية واحدة . أى خط أو منحنى فى هذا الرسم يمثل عملية معينة لتغير الحالة .

خلاصة :

1 ـ فى حالة الغازات المثالية ، يمكن استخدام قانون الغاز المثالى لحساب درجة الحرارة عند أى نقطة فى الرسم البيانى PV .

2 ـ الخط الأفقى فى الرسم البيانى PV يمثل عملية أيسوبارية .

3 ـ الخط الرأسى يمثل عملية ثابتة الحجم (أيسوكورية) .

حساب ΔU نتيجة لتغيرات الحالة

يمكن حساب ΔU لأى تغير فى الحالة بمعلومية درجتى الحرارة الابتدائية والنهائية :

$$\Delta U = nC_V \Delta T$$

الحرارتان النوعيتان الجزيئتان (المولاريتان) للغازات المثالية

للعمليات ثابتة الحجم (C_V) :

$$C_V = \frac{3}{2}R \qquad \text{(للغاز أحادى الذرة)}$$

$$C_V = \frac{K}{2}R \qquad \text{(للغاز الجزيئى)}$$

K عدد صحيح تقريبًا ، وتعتمد قيمته على نوع الغاز ودرجة حرارته (انظر القيم الفعلية للحرارة النوعية C_V فى الجدول 1-12) .

للعمليات ثابتة الضغط (C_p) :

$$C_p = C_V + R \qquad \text{لجميع الغازات}$$

خلاصة :

1 ـ النسبة بين الحرارتين النوعيتين γ هى كمية هامة :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

2 ـ فى العمليات الأدياباتية تتغير P مع V بحيث تكون PV^{γ} ثابتًا :

حساب الشغل فى العمليات الديناميكية الحرارية

يعتمد الشغل على نوع العملية ، يمكن حساب W جبريًا فى العمليات الأربع كالتالى :

1 ـ فى العملية الأيسوكورية : $W = 0$

2 ـ فى العملية الأيسوبارية : $W = P\Delta V$

3 ـ فى العملية الأيسوثرمية : $W = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$

4 ـ فى العملية الأديابتية : $W = -(\Delta U)$

فى جميع العمليات الأخرى يمكن تعيين الشغل بيانيًا بإيجاد المساحة الواقعة تحت منحنى العمليـة فـى الرسم البيـانى PV . ويستدل على إشارة W بملاحظة ما إذا كان الحجم يزداد أو يقل نتيجة للعملية .

حساب الانتقال الحرارى فى العمليات الديناميكية الحرارية

يمكن حساب كمية الحرارة المنتقلة بطريقة مباشرة بالنسبة للعمليات الأربع :

1 ـ فى العملية الأيسوكورية : $Q = nC_V\,\Delta T$

2 ـ فى العملية الأيسوبارية : $Q = nC_p\,\Delta T$

3 ـ فى العملية الأيسوثرمية : $Q = nRT\ln\frac{V_2}{V_1}$

4 ـ فى العملية الأديابتية : $Q = 0$

فى العمليات الأخرى يمكن حساب Q من القانون الأول بعد إيجاد W و Q بالطرق السابق وضعها :

$$Q = \Delta U + W$$

تعريف عملية تخفيف الضغط بالخنق

عملية تخفيف الضغط بالخنق (وتعـرف أيضـًا بالتـمدد الحر) هى عملية تمدد غاز تحت ضغط عال تمددًا أدياباتيًا خلال فتحة صغيرة إلى منطقة فراغ أو ضغط صغير جدًا بالنسبة إلى ضغط الغاز المتمدد .

خلاصة :

1 ـ حيث أن الغاز لا يبذل شغلاً خلال التمدد الحر ، وحيث أن $Q = 0$ لأن العملية أدياباتية ، فإن درجة حرارة الغاز المثالى لا تتغير .

2 ـ عندما يتمدد سائل فى الفراغ مع تغير طوره إلى الطور الغازى ، تستمد حرارة التبخير من الطاقة الداخلية للسائل ، وهذا يؤدى إلى انخفاض درجة حرارة المادة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ يدعى مخترع أن لديه محرك يبدأ العمل بواسطة بطارية ، ولكنه يستمر فى العمل بعد ذلك بدون أى مصدر خارجى للقدرة ، ويقوم أثناء ذلك بإعادة شحن البطارية وبذل الشغل الخارجى . هذا يتعارض مع أحد قوانين الطبيعة ، ما هو هذا القانون ؟ وماذا يقول القانون الأول عن آلات الحركة الدائمة ؟

2 ـ العلاقة $\Delta U = Q - W$ لا تكافئ العلاقة $\Delta U = Q - P\Delta V$ دائمًا . إعط مثالاً لا تنطبق عليه العلاقة الثانية رغم انطباق العلاقة الأولى عليه .

3 ـ وضح معنى كل كمية فى المعادلة $\Delta U = Q - W$ فى كل من العمليات الآتية :

انصهار مكعب من الثلج ببطئ متحولاً إلى ماء عند $0°C$ ، تسخين الثلج من درجة $-30°C$ إلى $-10°C$ ، تبريد بخار الماء فى غلاية مغلقة من درجة $120°C$ إلى $110°C$ ، تسامى (التحول من الطور الصلب إلى الطور الغازى مباشرة بدون المرور على الطور السائل) CO_2 الصلب (الثلج الجاف) فى الهواء داخل إناء كبير ، تجمد زجاجة مياه غازية وشرخ الزجاجة .

4 ـ بالرغم من أن $C_P - C_V = R$ للغازات المثالية ، إلا أن الفرق بين الحرارتين النوعيتين لوحدة الكتلة $c_P - c_V$ تتغير من غاز إلى غاز . ما السبب فى هذا الاختلاف ؟

5 ـ كيف يمكن تعيين الكتلة الجزيئية لغاز بقياس c_P و c_V لهذا الغاز ؟

6 ـ يراد ضغط كمية من غاز فى إناء إلى نصف حجمها الأصلى . متى تكون كمية الشغل المبذول أكبر ، عندما يكون الانضغاط أيسوثرميًا أو أدياباتيًا ؟

7 ـ وضعت أسطوانتان يغلق كل منهما كباس قابل للحركة جنبًا إلى جنب ، وكانت الأسطوانتان متماثلتين من جميع الوجوه عدا أن إحداهما كانت تحتوى على غاز الأكسجين O_2 ، بينما تحتوى الأخرى على غاز الهليوم He . ضغطت الأسطوانتان أدياباتيًا إلى خمس حجمها الأصلى . أى الغازين ترتفع درجة حرارته أكثر من الآخر ؟

مسائل

القسم 12-2

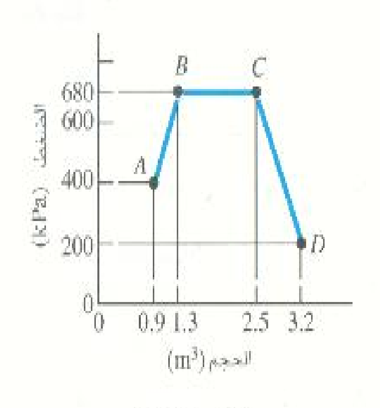
1 ـ ينصهر قالب من الثلج كتلته 2.2 kg إلى ماء عند درجة حرارة $0°C$. بأى قدر تتغير الطاقة الداخلية للثلج ؟ إهمل التغير الصغيرة فى الحجم .

2 ـ ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية لقطعة من النحاس عند تسخينها من $27°C$ إلى $115°C$ ؟ إهمل التغير الصغير فى الحجم .

3 ـ ما مقدار الانخفاض فى درجة حرارة قطعة من الألمنيوم كتلتها 65 g ، إذا كان التغير فى طاقتها الداخلية 350 J ؟ إهمل أى تغير فى الحجم .

4 ـ ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية لكمية من الرصاص المنصهر كتلتها 265 g عندما تتجمد عند نقطة انصهارها ؟ إهمل أى تغير فى الحجم .

القسم 3-12



شكل م1-12

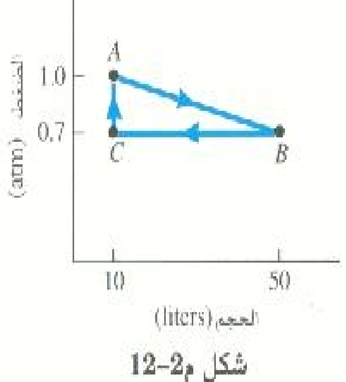
5 ـ يوضح الشكل م 1-12 الرسم البيانى PV لغاز محبوس فى أسطوانة ذات كباس . ما مقدار الشغل الذى يبذله الغاز عند تمدده من الحالة A إلى الحالة C باتباع المسار الموضح ؟

6 ـ ما مقدار الشغل الذى يبذله الغاز عند انضغاطه من الحالة D إلى الحالة A باتباع المسار الموضح بالرسم البيانى PV فى الشكل م 1-12 ؟

7 ـ ضغط غاز مثالى أيسوثرميًا إلى خمس حجمه الأصلى ، وكان مقدار الشغل المبذول لضغط الغاز إلى الحجم الجديد 167 J . (أ) ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية للغاز ؟ (ب) ما هى كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة الغاز ؟

8 ـ تمدد غاز مثالى إلى ثلاثة أمثال حجمه ، وكان الشغل المبذول بواسطة الغاز أثناء التمدد 350 J وكمية الحرارة المضافة 570 J . (أ) هل ترتفع درجة حرارة الغاز أم تنخفض أو تظل ثابتة عند انتهاء العملية ؟ (ب) ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية ؟

9 ـ سخنت كمية معينة من غاز الهليوم فى إناء مغلق صلب من −95°C إلى 70°C ، وكانت كمية الحرارة المضافة أثناء عملية التسخين 130 J . ما هى كمية الهليوم (بالجرام والمول) داخل الإناء ؟



شكل م2-12

■ 10 ـ يمثل الشكل م 2-12 دورة ديناميكية حرارية تتغير فيها حالة غاز مثالى من A إلى B ، ثم من B إلى C ، وتعود أخيرًا إلى الحالة الأصلية A . احسب الشغل المبذول بواسطة الغاز خلال الدورة بأكملها . **تلميح** : تأكد من صحة إشارات W فى كل خطوة بالدورة .

القسم 5-12

■ 11 ـ افترض أن كمية من غاز الأرجون قدرها 2.3 mol قد سخنت من −45°C إلى 90°C . أوجد التغير فى الطاقة الداخلية للغاز والشغل المبذول بواسطة الغاز عندما يحدث التسخين (أ) عند ثبوت الحجم ، (ب) عند ثبوت الضغط .

12 ـ ملأ إناء صلب حجمه 700 liters بغاز النيتروجين N_2 عند معدل الضغط ودرجة الحرارة . ما هى كمية الحرارة (بالجول) اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز إلى 27°C ؟ ما ضغط الغاز عند 27°C ؟

13 ـ النسبتان الكتليتان لغازى الأكسجين O_2 والنيتروجين N_2 فى الهواء هما بالتقريب 21% و 79% ، على الترتيب . استخدم هذه الحقيقة فى حساب c_V للهواء .

■ 14 ـ هل يمتص الغاز المثالى أحادى الذرة الحرارة أم يفقدها عند انضغاطه من 795 cm^3 إلى 260 cm^3 تحت ضغط ثابت قدره 155 kPa ؟ ما مقدار هذه الكمية من الحرارة ؟ اعتبر أن درجة الحرارة الابتدائية 230°C .

15 ـ ملأ بالون بحجم قدره 4.5 m^3 من الهليوم عند الضغط ودرجة الحرارة العياريين . ما هى كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الغاز إلى 37°C عندما يتمدد البالون عند الضغط الجوى ؟

القسمان 6-12 و 7-12

16 ـ ما مقدار الشغل اللازم لضغط غاز أيسوثرميًا من 125 liters إلى 60 liters إذا كان الغاز يفقد أثناء العملية كمية من الحرارة قدرها 35 cal ؟

17 ـ ما هي كمية الشغل اللازمة لضغط 3.3 mol من غاز O_2 عند درجة 25°C أيسوثرميًا من $90\ cm^3$ إلى $40\ cm^3$ ؟ ما مقدار كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة الغاز ؟

18 ـ كرر المسألة 17 عندما يحدث الانضغاط أدياباتيًا وليس أيسوثرميًا .

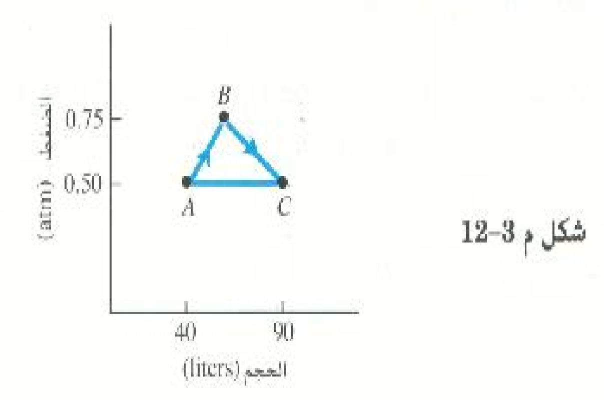
19 ـ إذا كانت γ لغاز مثالى تساوى 1.28 ، أوجد قيمتى C_P و C_V للغاز .

20 ـ إذا كانت $C_P = 5R/2$ لغاز مثالى ، أوجد قيمة γ للغاز .

■ 21 ـ رفعت درجة حرارة 90 g من غاز N_2 من 10°C إلى 100°C عند ضغط ثابت قدره 1 atm . أوجد كلاً من ΔU و ΔW و Q لهذه العملية .

■ 22 ـ عد إلى المسألة 10 واحسب التغير فى الطاقة الداخلية للغاز وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة فى كل من العمليات AB و BC و CA . افترض أن كتلة الهليوم 5 g .

■■ 23 ـ مر 2 mol من غاز مثالى ($\gamma = 1.40$) بالعملية الديناميكية الحرارة ABC الموضحة بالشكل م 3-12 . أوجد الشغل المبذول والتغير فى الطاقة الداخلية وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة .



شكل م 3-12

■ 24 ـ ضغط (2/3 mol) من غاز مثالى أدياباتيًا فارتفعت درجة حرارته بمقدار 45°C عندما كان الشغل المبذول بواسطة الضاغط على الغاز 370 J . (أ) ما مقدار التغير فى الطاقة الداخلية للغاز أثناء الانضغاط ؟ (ب) إذا برد الغاز بعد ذلك إلى درجة حرارته الأصلية مع حفظ حجمه ثابتًا أثناء العملية ، فما هى كمية الحرارة التى يفقدها الغاز ؟ (جـ) ما قيمة كل من C_V و γ لهذا الغاز ؟

■ 25 ـ أسطوانة ذات كباس قابل للحركة تحتوى على 30 g من غاز الهيدروجين H_2 . سخن الغاز من درجة 20°C إلى 270°C عند ضغط ثابت مقداره 4.4 atm . ما هى كمية الحرارة اللازمة لهذه العملية ؟

■ 26 ـ أسطوانة حجمها $16{,}000\ cm^3$ ذات كباس قابل للحركة تحتوى على 1.1 mol من غاز CO_2 عند درجة 30°C . ضغط الكباس فجأة بحيث انضغط الغاز أدياباتيًا إلى حجم قدره $1600\ cm^3$. أوجد درجة الحرارة النهائية للغاز والشغل المبذول عليه .

■ 27 ـ تمددت كمية من غاز النيتروجين N_2 أدياباتيًا من الضغط الابتدائى 25 atm ودرجة الحرارة الابتدائية 27°C فأصبحت درجة حرارته النهائية -25°C . كم مرة زاد حجم هذا الغاز ؟

■ 28 ـ كمية من غاز الأكسجين O_2 حجمها 2 liters عند ضغط قدره 10 atm ودرجة حرارة قدرها 27°C . أوجد الضغط النهائى إذا سمح للغاز بالتمدد إلى حجم جديد قدره 10 liters (أ) أيسوثرميًا ، (ب) أدياباتيًا .

■ 29 ـ ضغط كمية من غاز الهليوم عند درجة 27°C وضغط 1.6 atm أدياباتيًا إلى ربع حجمها الأصلى . أوجد الضغط ودرجة الحرارة النهائيين للغاز .

مسائل عامة

30 ـ عينة من الـهواء ($\gamma = 1.40$) حجمها الأصلى $V_1 = 20$ L ودرجة حرارتها الأصلية $T_1 = 290$ K . ضغطت هذه العينـة ببطئ من ضغط قدره 1 atm إلى 2.0 atm بحيث ظلت درجة الحرارة ثابتة أثناء هـذا الانضغاط . بعدئذ تمدد الـهواء فجأة (أدياباتيًا) إلى ضغطه الأصلى 1 atm . (أ) ارسم الرسم البيانى PV لـهذه العمليات . (ب) أوجد الحجـم ودرجـة الحرارة النهائيين . (جـ) أوجد ΔU و Q و W لكل عملية .

31 ـ غليت كمية من الماء السائل كتلتها 1 kg عند ضغط قدره 1 atm ودرجة حرارة قدرها 100°C فتحولت إلى بخار حجمه 1.67 m^3 . (أ) ما هى كمية الحرارة التى تحولت إلى شغل تمددى نتيجة للغليان ؟ (ب) ما هـى كميـة الحـرارة التـى تحولت إلى طاقة داخلية ؟

32 ـ افترض أن لديك 36 g من الماء عند درجة حرارة ابتدائية قدرها 20°C وضغط ابتدائى قدره 1 atm . ما هى كميـة الحـرارة اللازمة لرفع درجة حرارة الماء إلى نقطة الغليان ثم غلى الماء ثم رفع درجة حرارة بخار الماء إلى 150°C مـع بقـاء الضغط ثابتًا عند 1 atm . **تلميح** : بخار الماء غاز جزيئى ثلاثى الذرات له ثلاث درجات حرية دورانية نشطة فى هـذا المدى من درجات الحرارة بالإضافة إلى درجات الحرية الانتقالية العادية .

33 ـ ما قيمة ذلك الجزء من كمية الحرارة المضافة الذى يتحول إلى طاقة داخلية ، والجزء الذى يتحول إلى شغـل تمـددى أثنـاء تمدد ثابت الضغط لغاز مثالى إذا علمت أن $\gamma = 1.28$ لـهذا الغاز .

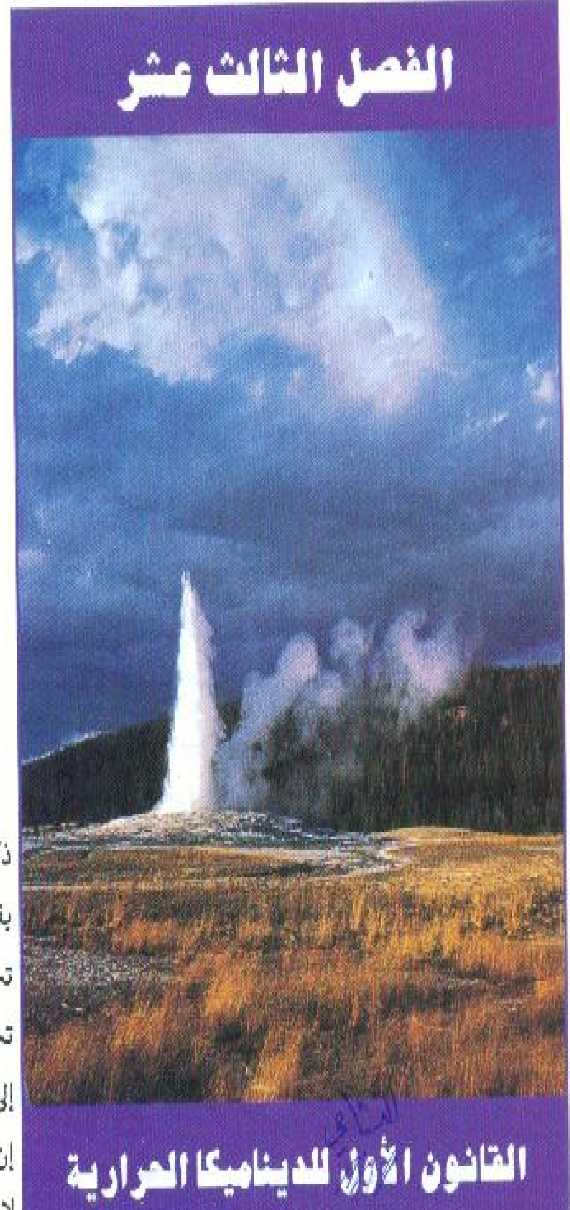
34 ـ يمر 30 kg من CO_2 بعملية انضغاط أيسوثرمى عند $T = 500$ K وتتغير كثافتـه نتيجـة لذلـك مـن 30.75 kg/m^3 إلى 30.0 kg/m^3 . (أ) ما مقدار الضغط الابتدائى للغاز ؟ (ب) احسب الشغل المبذول على الغاز والتغير فى طاقته الداخلية وكمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة أثناء العملية .

35 ـ سخنت كتلة من الألومنيوم مقدارها 1 kg من درجة 25°C إلى 600°C . ما قيمـة الشغـل الـذى يبذلـه الألومنيـوم أثنـاء التمدد ضد الضغط المحيط ومقداره 1 atm ؟ احسب نسبة هذا الشغل إلى كميـة الحـرارة المضافـة W/Q ، وعـين إلى أى حد من الضباطة يعتبر التقريب $W = Q$ صحيحًا .

36 ـ حبست كمية من غاز الأرجون داخل أسطوانة رأسية قطرها 8.0 cm بواسطة كباس كتلته 15.0 kg يمكنـه أن يتحـرك بحرية فى الاتجاه الرأسى . وضعت الأسطوانة داخل غرفة تفريغ بعد عزلـها عزلاً حراريًا جيـدًا عـن الوسط المحيـط . وعندما كانت درجة حرارة الأرجون داخل الأسـطوانة 35°C وضغط الـهواء فـى الغرفـة الخـارجيـة 760 torr ، استقر الكباس فى موضع اتزان يرتفع عن قاعدة الأسطوانة بمقدار 22.5 cm . (أ) ما عدد المولات من الأرجون داخل الأسطوانة ؟ ، (ب) فرغت الآن غرفة التفريغ من الـهواء (أى أصبح الضغط داخلـها أقل من 0.001 torr) . أين يقع موضـع الاتـزان الجديد للكباس وما هى درجة الحرارة الجديدة للأرجون ؟

37 ـ لديك غاز مثالى ثنائى الذرة حرارته النوعية الكتلية $c_V = 920$ J/kg.K . أوجد القيم التقريبية (أ) للكتلة الجزيئيـة M ، (ب) لكل من الحرارتين النوعيتين C_V ، C_P ، (جـ) للنسبة γ .

38 ـ ضغط الـهواء عند قاعدة جبل 1.0 atm ودرجة حرارته 300 K . (أ) إذا كان الـهواء يرتفع أدياباتيًا إلى قمة الجبل ، حيث $P = 0.94$ atm ، فماذا ستكون درجة حرارته ؟ (افترض أن الـهواء يتكون من غاز النيـتروجين N_2 والأكسجين O_2 فقط) . (ب) هل ترتفع درجة حرارة الـهواء أو تنخفض عندما يتكثف بعض بخار الماء منه ؟



الفصل الثالث عشر

القانون الأول للديناميكا الحرارية

ذكرنا آنفًا أن القانون الأول للديناميكا الحرارية هو صيغة لمبدأ بقاء الطاقة ، وأن أى عملية قد تخرق هذا القانون لا يمكن ، تحدث تلقائيًا . فالحجر الساكن على الأرض مثلاً لا يستطيع تحويل الطاقة الحرارية الموجودة فيه أو فى الوسط المحيط به إلى طاقة حركة تمكنه من الانطلاق تلقائيًا إلى أعلى فى الهواء . إن القانون الأول لا يستبعد هذه الإمكانية ، ومع ذلك فإنها لا تحدث أبدًا . وإذا وضعت بعض قطع من الثلج فى إناء يحتوى على ماء ساخن سوف نجد أن الخليط يصل بعد فترة زمنية ما إلى درجة حرارة اتزان معينة بين درجتى الماء الساخن والثلج البارد ، ولا يحدث مطلقًا أن يصبح الثلج أكثر برودة وأن يصبح الماء أكثر حرارة ، هذا بالرغم من أن الطاقة تظل محفوظة فى الحالتين . هذا يدل على أن للطبيعة اتجاه مفضل لحدوث الأحداث التلقائية ، كما لو أن الطبيعة قد أصدرت حكمها الأبدى بألا يكون الزمن انعكاسيًا . فالزمن كالسهم الذى يشير فى اتجاه واحد فقط ، ومن ثم يجب أن تتبع كل العمليات الطبيعية التلقائية ذلك المسار الذى اختارته الطبيعة لها .

وسوف نرى هنا أن القانون الثانى للديناميكا الحرارية هو المبدأ الضرورى لتفسير اتجاه سهم الزمن . وهذا القانون يخبرنا أن النظام فى الكون يتجه بقسوة وعناد تجاه اللانظام (أو الفوضى) ، وهذا ما سوف يتضح لنا عند تناول موضوع النظام واللانظام .

13-1 النظام واللانظام (الفوضى)

يعلم كل مقامر أن احتمال حدوث حدث معين يزداد كلما أمكن أن يتحقق ذلك الحدث بطرق كثيرة مختلفة . ولتوضيح هذه الحقيقة ، لنأخذ لعبة إلقاء خمس قطع عملة معدنية

متماثلة على منضدة بعد هزها فى كوب مثلاً هزًا جيدًا . هناك ستة أحداث ممكنة فقط يمكن أن تحدث فى كل رمية (جدول 1-13) .

قد يبدو للوهلة الأولى أن احتمال حدوث كل من الأحداث المدرجة بالجدول 1-13 متساوى ، ولكن هذا ليس صحيحًا . ذلك أن هناك طريقة واحدة فقط لحدوث الحدث 1 أو الحدث 6 ، ولكن هناك خمس طرق مختلفة لحدوث الحدث 2 . وإذا رمزنا لقطع العملة الخمس بالحرف A, B, C, D, E سنجد أن هذه الطرق كما هو موضح بالجدول 2-13 . وحيث أن عدد الطرق التى يمكن أن يتحقق بها الحدث 2 أكبر خمس مرات من عدد الطرق التى يتحقق بها الحدث 1 ، فإن احتمال حدوث الحدث 2 أكبر خمس مرات من احتمال حدوث الحدث 1 . وحيث أن الحدث 5 يمكن أن يتحقق بخمس طرق مختلفة أيضًا ، إذن ، احتمال حدوث كل من الحدثين 2 و 5 متساوى . ومن الواضح أن احتمال حدوث كل من الحدثين الأخيرين أكبر خمس مرات من احتمال حدوث كل من الحدثين 1 و 6 .



لكل من الكرات المرقمة العشرة فى آلة اللوتارية نفس احتمالية الاختيار . هل يمكنك حساب العدد الكلى للحالات الميكروئية ؟

لنتوقف لحظة لتلخيص هذه الملاحظات بصورة عامة . عند تعريف كل حدث فى الجدول 1-13 اعتبرنا أن قطع العملة الخمس كلها متكافئة ، بمعنى أنه لا فرق بين أن تظهر الصورة أو الكتابة على الوجه العلوى **لهذه القطعة أو تلك** . ويسمى كل حدث عندئذ **بالحالة الماكروئية (الكلية)** للترتيبات الممكنة لقطع العملة . ويوضح الجدول 2-12 الطرق المختلفة التى تكون بها قطع العملة المنفردة حالة ماكروئية واحدة هى بالتحديد الحدث 2 فى الجدول 1-13 ، وسوف نسمى كلاً من الترتيبات المختلفة بالجدول 2-13 (التى تناظر نفس الحدث ، 2) **بالحالة الميكروئية (المجهرية)** .

هذا ويمثل الجدول 2-13 عدد الحالات الميكروئية لكل حدث بالجدول 1-13 .

يمكن تعريف احتمالية حدوث حالة ماكروئية معينة على أساس الفرض البسيط التالى :

كل حالة **ميكروئية** لها نفس احتمالية الحدوث ، أى أن احتماليات حدوث جميع الحالات الميكروئية المناظرة لحالة ماكروئية معينة متساوية .

جدول 1-13 :

يوجد ست نتائج (أحداث) ممكنة فى لعبة إلقاء قطع العملة المعدنية الخمس .

الحدث	صورة	كتابة
1	0	5
2	1	4
3	2	3
4	3	2
5	4	1
6	5	0

جدول 2-13 :

الطرق المختلفة لحدوث الحدث 2.

عدد الطرق	A	B	C	D	E
1	ص	ك	ك	ك	ك
2	ك	ص	ك	ك	ك
3	ك	ك	ص	ك	ك
4	ك	ك	ك	ص	ك
5	ك	ك	ك	ك	ص

ص ـ صورة .

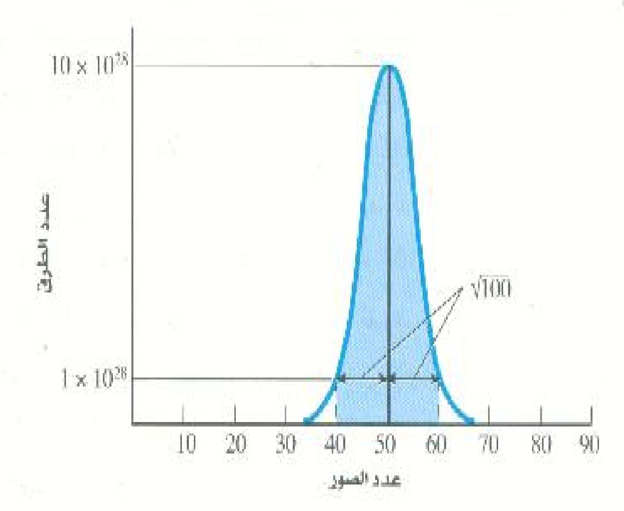
ك ـ كتابة .

جدول 3-13 :

جدول الاحتمالية لقطع العملة الخمس .

الحدث الحالة الماكروئية	عدد الطرق (الحالات الميكروئية)	احتمالية الحالة الماكروئية
1	1	$\frac{1}{32} = 0.03$
2	5	$\frac{5}{32} = 0.16$
3	10	$\frac{10}{32} = 0.31$
4	10	$\frac{10}{32} = 0.31$
5	5	$\frac{5}{32} = 0.16$
6	1	$\frac{1}{32} = 0.03$

وهكذا ، تعرف احتمالية حدوث حدث معين (حالة ماكروئية معينة) ببساطة بأنها نسبة عدد الحالات الميكروئية التي يمكن أن تكون لذلك الحدث إلى العدد الكلي للحالات الميكروئية التي يمكن حدوثها . فمثلاً ، العدد الكلي للحالات الميكروئية المتاحة لخمس قطع من العملة هو $32 = 2^5$ ، وعليه فإن احتمالية حدوث الحدث 2 تساوي $5/32 = 15.6$ % . ويوضح الجدول 3-13 احتمالية كل من الأحداث الستة بالجدول 1-13 .



شكل 1-13:
عدد الطرق التى يظهر فيها العدد المبين من الصور على الوجه العلوى عند إلقاء 100 قطعة معدنية . عدد الطرق التى يظهر فيها على الوجه العلوى أقل من 30 صورة (أو أكثر من 70 كتابة) صغير جدًا بحيث لا يمكن تمثيله فى هذا الرسم البيانى ، ويمكن اعتباره صفرًا بالتقريب . لاحظ أن 90% تقريبًا من العدد الكلى للطرق يقع بين 40 و 60 صورة .

يمكننا تعميم هذا بالأسلوب المنطقى للدراسة على الحالات التى تتضمن عدد أكبر من قطع العملة ، وليكن 100 على سبيل المثال . فى هذه الحالة يكون العدد الكلى للحالات الميكروئية المتاحة $2^{100} = 1.3 \times 10^{30}$! ويلاحظ أن **واحدة** فقط من هذه الحالات الميكروئية تناظر الحالة الماكروئية التى تظهر فيها الصورة على جميع الأوجه العلوية لقطع العملة المائة ، وواحدة فقط تناظر ظهور الكتابة على الأوجه العلوية جميعًا . ومن جهة أخرى فهناك تقريبًا 10×10^{28} حالة ميكروئية لتكوين الحالة الماكروئية لظهور 50 صورة و 50 كتابة على الأوجه العلوية لقطع العملة (الشكل 1-13) . ومع ذلك فإن **الحالة الميكروئية لظهور 100 صورة على الوجه العلوى لها نفس الاحتمالية كغيرها من باقى الحالات الماكروئية الأخرى** ، ولكن احتمالية **الحالة الماكروئية** « 100 صورة » أقل بنسبة قدرها 10^{-29} من الحالة الماكروئية « 50 صورة و 50 كتابة » . هذ ويلخص الشكل 1-13 جميع الاحتماليات الممكنة فى حالة 100 قطعة عملة .

من الممكن تلخيص جميع هذه النتائج بطريقة بسيطة جدًا . لاحظ فى الشكل 1-13 أن الخط البيانى يقل إلى حوالى عشر قيمته العظمى عند النقطتين 40 صورة و 60 صورة . ولتقدير اتساع ذروة المنحنى يمكننا القول أنها تمتد من 10-50 إلى 10+50 ، بمعنى أنك إذا لقيت 100 قطعة عملة فإن عدد الصور التى يجب ظهورها على الوجه العلوى يساوى حوالى 50 ± 10 . النتيجة العامة إذن هى :

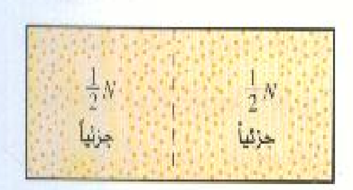
ويسمى العدد التالى للإشارة ± الانحراف المتوقع ، وهو يدلنا على المدى الذى يقع فيه

عدد الصور . ويبين التحليل الإحصائى التفصيلى أن 4 فى المائة فقط من عدد إلقاءات قطع العملة المائة سوف يعطى عددًا من الصور خارج هذا المدى .

وعند زيادة عدد قطع العملة إلى مليون (10^6) قطعة ، سيكون من المتوقع ظهور عدد قدره $500,000 \pm 1000$ من الصور على الوجه العلوى . لاحظ مدى دقة هذه النتيجة ، فهى تدل على أن عدد الصور يقع بين 501,000 و 499,000 ، وهو مدى ضيق جدًا فى الواقع . وبزيادة عدد قطع العملة إلى قيمة كبيرة جدًا ، سنجد أن الانحراف المئوى عن القيمة المتوسطة ضئيل جدًا .

هذا المثال عن قطع العملة هو مثال نموذجى لما يحدث فى الكون عمومًا . فإذا تركت الأحداث لتتم بنفسها تلقائيًا دون أى تدخل خارجى ، فإنها سوف تحدث طبقًا لقوانين الاحتمال الإحصائية . فمثلاً ، لنفرض أن لدينا صندوقًا يحتوى على عدد قدره 10^{20} من جزيئات غاز ما ، كما هو موضح بالشكل 2-13 ، والسؤال الآن هو : ما هى الفرص لأن نجد كل هذه الجزيئات متكدسة جميعًا فى أحد نصفى الصندوق ؟ من الممكن الإجابة عن هذا السؤال باستخدام النتائج التى توصلنا إليها فى مثالنا عن قطع العملة . ففى هذا الموقف يمثل كل من نصفى الصندوق إمكانيتين متساويتين لأى جزئ من جزيئات الغاز ، وهذا يشبه تمامًا إمكانيتى الصورة والكتابة فى حالة قطع العملة . وهكذا تخبرنا نتيجتنا السابقة أن عدد الجزيئات على أحد جانبى الصندوق يكون :

$$\frac{1}{2}(10^{20}) \pm \sqrt{10^{20}} = 5 \times 10^{19} = (5,000,000,000 \pm 1) \times 10^{10}$$



شكل 2-13:
ما هو احتمال تواجد جميع الجزيئات فى أحد نصفى الصندوق ؟

لاحظ أن الانحراف المتوقع صغير جدًا ، فهو يبلغ جزءًا واحدًا فقط من 5 بليون جزء . ولهذا يمكننا لجميع الأغراض العملية ، اعتبار أن عدد الجزيئات فى أحد نصفى الصندوق يساوى عددها فى النصف الآخر . وبالطبع ، لن توجد تقريبًا أى فرصة على الإطلاق أن تتكدس جميع الجزيئات تلقائيًا فى أحد نصفى الصندوق ، لأن هذه الحالة الماكروئية تمثلها حالة ميكروئية واحدة (من بين $2^{10^{20}}$ حالة) .

ويستنتج من ذلك أن هذه الاعتبارات ذات أهمية جوهرية فى جميع العمليات التلقائية . ويمكننا على أساسها أن نتنبأ بأن الحركة الحرارية (وغيرها من الاضطرابات العشوائية الأخرى) تتسبب فى تغيير حالة النظام الديناميكى الحرارى من النظام إلى الفوضى . وكمثال فج لذلك ، لنعد إلى حالة القطع المعدنية المائة السابقة . لنفرض أننا رتبنا هذه القطع جميعًا بعناية بحيث تكون الصور على الوجه العلوى ؛ وهذه حالة على درجة عالية من النظام . لنحركها الآن حركة شبيهة بالحركة الحرارية العشوائية بأن نقوم برجها رجًا شديدًا . عندئذ سوف **يختل النظام بسرعة ولن تعود قطع العملة أبدًا إلى حالة النظام الأصلية ذات الاحتمالية الضئيلة .**

وبالمثل ، يمكننا وضع جزيئات الغاز فى الشكل 2-13 فى حالة عالية النظام بوضعها جميعًا فى أحد نصفى الصندوق . والآن ماذا يحدث إذا سمح للجزيئات بأن تعيد ترتيب نفسها تلقائيًا عن طريق الحركة الحرارية العشوائية ؟ عندئذ سوف يختل النظام

ويتحول إلى فوضى بحيث تملأ الصندوق كله ، ولن تعود تلقائيًا إلى حالة النظام الابتدائية أبدًا .

يتضح لنا مما سبق أن مفهومى النظام واللانظام (الفوضى) مفهومان أساسيان فى هذه المناقشة . وقد رأينا أن أعلى حالات النظام يمكن أن تحدث فى حالة ميكروئية واحدة فقط ، حيث ترتب كل قطعة عملة أو كل جزئ بطريقة مضبوطة واحدة . وعلى العكس ، هناك طرق كثيرة لتحقيق حالات اللانظام ، وهذه هى **أكثر الحالات احتمالاً** . ولذلك فإن التغيرات التلقائية فى النظام الديناميكى الحرارى تتسبب فى انتقاله تجاه الحالات الأقل نظامًا ، أو الأكثر فوضى ، لأن هذه الحالات ذات احتمالية أكبر . وتلخيصًا لذلك نقول :

إذا سمح لنظام ديناميكى حرارى معزول مكون من أجزاء كثيرة بتغيير حالته تلقائيًا ، فإن هذه التغيرات تتم بحيث تؤدى إلى زيادة اللانظام (الفوضى) ، أو عدم نقصه فى أحسن الأحوال .

هذا القانون من قوانين الطبيعة ، الذى ينطبق على الأعداد الهائلة من الجزيئات ، هو أحد صور **القانون الثانى للديناميكا الحرارية** . وهو يفسر ميل الأنظمة الديناميكية الحرارية إلى الوصول إلى الاتزان الديناميكى الحرارى ، هذا بالرغم من أن القانون الأول لا يتطلب حدوث مثل هذه التغيرات . ذلك أن حالة الاتزان ؛ التى لا يميل النظام الديناميكى الحرارى إلى تغييرها تلقائيًا ، هى الحالة ذات الاحتمالية العظمى ، وبالتالى حالة أعلى درجة من اللانظام .

13-2 الأنتروبيا

يمكن تناول مضمون كل من النظام واللانظام (الفوضى) بطريقتين مختلفتين تمامًا ، ومع ذلك فإن كلتا هاتين الطريقتين تستخدمان الكمية المعروفة **بالأنتروبيا** . والأنتروبيا مفهوم ديناميكى حرارى أدخله ر . كلوزيوس فى منتصف القرن التاسع عشر ليتمكن من وصف النتائج المترتبة على الحقيقة المعروفة بأن الحرارة تنساب دائمًا من الجسم الساخن إلى البارد . ونظرًا لتضارب الآراء حول التركيب الذرى للمادة فى ذلك الوقت ، فقد قام كلوزيوس بوصف الأنظمة الديناميكية الحرارية بدلالة متغيرات الحالة الماكروسكوبية للنظام P, V, T, U .

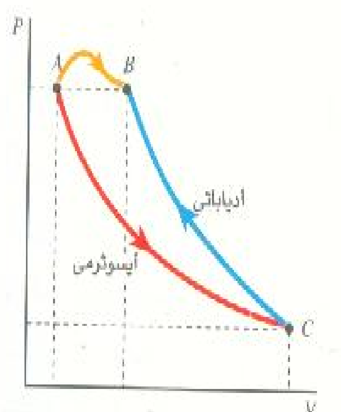
لنفرض أن كمية من الحرارة Q قد أضيفت إلى نظام ما بطريقة انعكاسية عند ثبوت درجة حرارته عند القيمة T . فى هذه الحالة يعرف التغير الناتج فى أنتروبيا النظام ΔS بالعلاقة :

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad (1-13)$$

ويتضح من هذا التعريف أن النظام **يكتسب** الأنتروبيا (أى أن ΔS يكون موجبًا) عندما

تنساب الحرارة إلى النظام . ويتبين من المعادلة (1–13) أيضًا أن وحدات الأنتروبيا هى J/K ، ولكنها تقاس أحيانًا بالوحدات الحرارية مثل kcal/K أو cal/K .

لاحظ أن ΔS معرف للعمليات الأيسوثرمية فقط . ومع ذلك فقد تمكن كلوزيوس من إثبات أن الانتروبيا دالة حالة للنظام ، كالطاقة الداخلية U . ومن ثم ، إذا وجد نظامان ديناميكيان حراريان فى نفس الحالة الماكروسكوبية (أى إذا تساوت متغيرات الحالة P, V, T للنظامين) ، سيكون للنظامين نفس الأنتروبيا . علاوة على ذلك فإن كون الانتروبيا دالة حالة يعنى أن التغير فى الأنتروبيا ΔS لا يعتمد على العملية التى تتغير بها حالة النظام . وقد يبدو للوهلة الأولى أن هذا يتناقض مع المعادلة (1–13) لأن Q تعتمد على نوع العملية الديناميكية الحرارية المستخدمة فى تغيير حالة النظام ، ولكن هذا التناقض الظاهرى يمكن حله بطرق عديدة منها ما يلى :



شكل 3–13:
حيث أن الأنتروبيا دالة حالة ، فإن التغير فى أنتروبيا النظام عندما تتغير حالته على طول المسار AB يساوى مجموع تغيرى الأنتروبيا على طول المسارين AC و CB .

1 ـ إن أى تغير من الحالة A إلى الحالة B يمكن تحقيقه بعملية أيسوثرمية إلى حالة وسيطة C تتبعها عملية أدياباتية من C إلى B .

2 ـ طبقًا للتعريف ، Q تساوى صفرًا فى حالة التغير الأدياباتى ، وعليه فإن $\Delta S_{CB} = 0$.

3 ـ وبالنسبة للعملية الأيسوثرمية AC نجد من المعادلة (1–13) أن $\Delta S_{AC} = Q/T$.

4 ـ إذن ، $\Delta S_{AB} = \Delta S_{AC} + \Delta S_{CB} = \Delta S_{AC}$ **مهما كان** مسار العملية من A إلى B .

والواقع أن النقطة 4 هى الخاصية المميزة لتعريف دالة الحالة . ومن الطبيعى أن حساب ΔS_{AC} يتطلب تعيين الحالة الوسيطة C ، وهذا ما يمكن تحقيقه دائمًا .

مثال 13-1 :

ما مقدار التغير فى أنتروبيا النظام عند انصهار مكعب من الثلج كتلته 20.0 g عند درجة 0.00°C .

استدلال منطقى :

سؤال : ما نوع هذه العملية ؟

الإجابة : ينصهر الثلج عند درجة حرارة ثابتة (القسم 6–11) ، وعليه فإن العملية أيسوثرمية .

سؤال : بماذا يتعين التغير الأيسوثرمى فى الأنتروبيا ؟

الإجابة : كمية الحرارة المتنقلة ودرجة الحرارة التى تحدث عندها العملية : $\Delta S = Q/T$.

سؤال : كيف يمكن إيجاد كمية الحرارة المتنقلة ؟

الإجابة : تعتمد كمية الحرارة المتنقلة على كتلة الثلج وحرارة انصهار الماء (جدول 11–2) : $Q = mH$.

الحل والمناقشة : بوضع $T = 273\ K$ نجد أن :

$$\Delta S = \frac{mH_f}{T} = \frac{(20.0\ g)(80.0\ cal/g)}{273\ K} = 5.86\ cal/K = 24.5\ J/K$$

هذه الزيادة في الأنتروبيا مقياس للفوضى فى ترتيب جزيئات الماء بعد أن تفقد بنيتها الصلبة المنظمة .

تمرين : إذا كان التغير فى درجة الحرارة صغيراً يمكن استخدام درجة الحرارة المتوسطة فى العلاقة الأيسوثرمية لحساب تغير الأنتروبيا . ما مقدار التغير فى الأنتروبيا إذا كانت درجة الحرارة الابتدائية للثلج $-10°C$ ؟ **الإجابة :** $24.7\ J/K$.

يرجع الفضل إلى الفيزيائى النمساوى لودفيج بولتزمان فى استنباط العلاقة بين الأنتروبيا ودرجة الفوضى فى النظام الديناميكى الحرارى . وقد أوضحنا فى مناقشتنا السابقة أن كل حالة ماكروئية للنظام يمكن أن تتحقق بعدد محدد من الحالات الميكروئية لترتيب جزيئات النظام . لنرمز إلى عدد الحالات الميكروئية المناظرة لحالة ماكروئية معينة بالحرف اليونانى أوميجا Ω . وبالطبع ، كلما زادت قيمة Ω ، كلما زادت احتمالية حدوث تلك الحالة الماكروئية . وعليه فإن حالة الاتزان (حالة أعلى احتمالية) هى الحالة المناظرة للقيمة العظمى لعدد الحالات الميكروئية Ω . وباستخدام هذه المفاهيم أثبت بولتزمان أن العلاقة بين الأنتروبيا S و Ω كالتالى :

$$S = k \ln \Omega \tag{13-2}$$

حيث k ثابت بولتزمان الموجود فى نظرية الحركة للغازات . فإذا كانت حالة ماكروئية معينة تتحقق نتيجة لحالة ميكروئية واحدة فقط ؛ فإن $\Omega = 1$. وحيث أن $\ln\ 1 = 0$ ، فإن المعادلة (13-2) تخبرنا أن أنتروبيا النظام فى مثل هذه الحالة غير المحتملة (الحالة عالية النظام) تساوى صفرًا . وبالمثل ، كلما زادت احتمالية الحالة الماكروئية (وبالتالى زادت درجة الفوضى) ، كلما زاد $\ln \Omega$ و S أيضًا . وبهذا أثبت بولتزمان أن **الأنتروبيا مقياس لدرجة الفوضى** فى الحالة الماكروئية للنظام . وبناء على ذلك يمكننا كتابة القانون الثانى للديناميكا الحرارية فى الصيغة التالية :

عندما تتغير حالة النظام المعزول فى عملية ديناميكية حرارية ، فإن هذا التغير يتم بحيث تزداد الأنتروبيا ، أو تظل ثابتة فى أحسن الأحوال .

مثال 13-2 :

افترض أن لديك صندوقًا يحتوى على 100 جزئ ، واعتبر حالتين ماكروئيتين لتوزيع الجزيئات فى الصندوق . فى الحالة A يحتوى أحد نصفى الصندوق على 60 جزيئًا ويحتوى النصف الآخر على 40 جزيئًا . أما فى الحالة B فإن الجزيئات تكون مقسمة بالتساوى على نصفى الصندوق . استخدم الشكل 13-1 لحساب تغير الأنتروبيا عند انتقال الصندوق من الحالة A إلى الحالة B .

استدلال منطقى :

سؤال : على ماذا تعتمد أنتروبيا الحالتين ؟

الإجابة : تعتمد الأنتروبيا على احتمالية الحالتين ، ومن المعلوم أن الاحتمالية تقاس بعدد الحالات الميكروئية التى تكون الحالة الماكروئية .

سؤال : كيف يمكن استخراج هذه المعلومات من الشكل 1-13 ؟

الإجابة : ذكرنا سابقًا أن التوزيع الجزيئى فى نصفى الصندوق هو نفس التوزيع كما فى مسألة سقوط قطع العملة المائة بالصورة أو الكتابة على أسطحها العلوية ويوضح الشكل 1-13 أن عدد الحالات الميكروئية يساوى 10^{29} فى الحالة B وحوالى عشر هذه القيمة فى الحالة A .

سؤال : ما هى العلاقة التى تعطى أنتروبيا النظام فى أى حالة ديناميكية حرارية ؟

الإجابة : تعريف بولتزمان للأنتروبيا $S = k \ln \Omega$. وعليه فإن الفرق بين أنتروبيا النظام فى الحالتين :

$$\Delta S = S_B - S_A = k (\ln \Omega_B - \ln \Omega_A)$$

الحل والمناقشة : بحساب الأنتروبيا فى الحالتين نجد أن :

$$S_A = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln(1 \times 10^{28}) = 8.90 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

$$S_B = (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln(1 \times 10^{29}) = 9.21 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

إذن :

$$\Delta S = (9.21 - 8.90) \times 10^{-22} \text{ J/K} = 0.31 \times 10^{-22} \text{ J/K}$$

لاحظ أن هذه زيادة فى الأنتروبيا ، وهذا يعنى أن حالة التوزيع المتساوى للجزيئات بين نصفى الصندوق (الحالة B) هى حالة على درجة أعلى من الفوضى ، وبالتالى حالة ذات احتمالية أعلى .

ملحوظة : يمكن حل هذه المسألة بطريقة مختصرة بملاحظة أن الفرق بين لوغاريتمى عددين يساوى لوغاريتم النسبة بينهما :

$$\Delta S = k (\ln \Omega_B - \ln \Omega_A) = k \ln \frac{\Omega_B}{\Omega_A}$$

$$= (1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}) \ln 10 = 0.32 \times 10^{-22} \; J/K$$

13-3 المحركات الحرارية : تحول الطاقة الحرارية إلى شغل

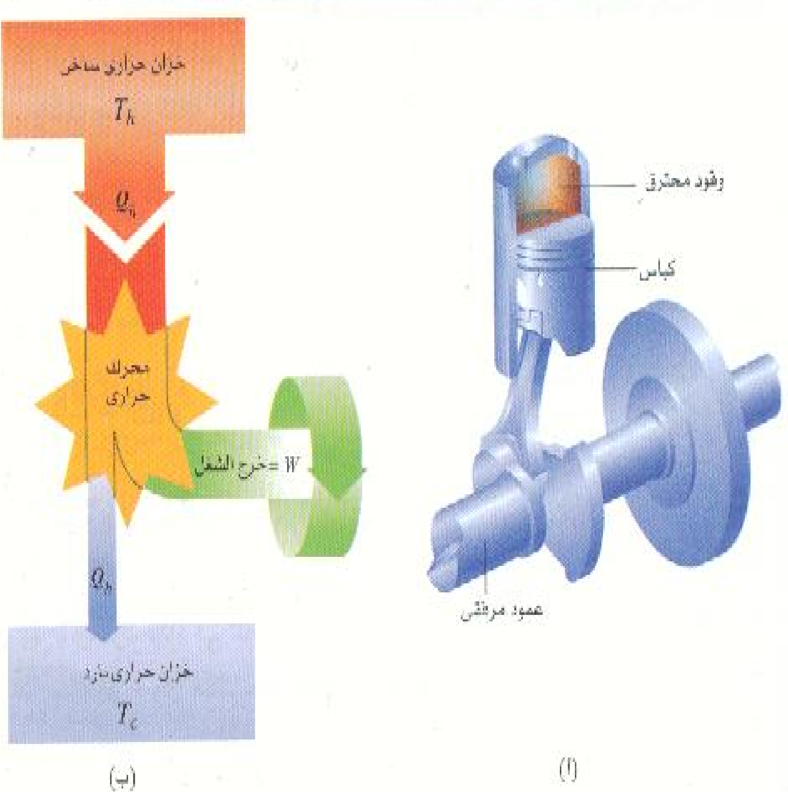
بدأ تطور علم الديناميكا الحرارية فى عصر الثورة الصناعية قرب نهاية القرن الثامن عشر ، وذلك هو الوقت الذى شهد اختراع المحركات البخارية التى أدت إلى تغيير هائل فى حضارتنا الإنسانية . ونظرًا لأن المحركات البخارية الأولى كانت آلات ذات كفاءة منخفضة للغاية ، فقد دعى علماء ذلك العصر إلى فحص القوانين الفيزيائية التى تحكم

هـذه المحركات ، وكانت هذه الدعوة بمثابة القوة الدافعة للأعمال المبكرة فى مجال الديناميكا الحرارية ، كما كان لنتائج هذه الأبحاث أثرًا كبيرًا فى تقدم جميع فروع العلم ابتداء من العلوم الفيزيائية وانتهاء بالعلوم البيولوجية .

المحرك البخارى مثال لما يعرف **بالمحركات الحرارية** . والمحرك الحرارى هـو **أى جهاز يقوم بتحويل جزء من الطاقة الحرارية إلى شغـل ميكـانيكى** . ومـن الواضـح أن المحرك البخارى يتفق مع هذا الوصف ، وهذا ينطبق أيضًا على المحرك البنزينى الـذى يستخدم الطاقة الحرارية المنطلقة نتيجة لاحتراق الوقود . كذلك فـإن المحركـات الأكـثر غرابة والتى تستخدم حرارة الشمس أو المفاعلات النووية هى أيضًا محركـات حراريـة . لنتعرف الآن على القوانين الفيزيائية التى تخضع لـها كل هذه المحركات .



المحركـات النفاثـة المسـتخدمة فـى الطائرات تحول الطاقة الحراريـة إلـى شغل ، ولكن العادم المشـاهد بوضـوح يبيـن أن جـزءًا كبـيرًا مـن الطاقـة الحرارية الحرارية يفقـد فـى صـورة حرارة .



شكل 13-4:
فـى المحـرك الحـرارى يجـب أن يتساوى دخل الطاقة Q_h مع مجموع العادم الحرارى Q_c وخرج الشغل .

يوضح الشكل 4-13 أ رسمًا تخطيطًا لمحرك حرارى بسيط . فى مثل هذا النوع من المحركات يؤدى احتراق الوقود فى الأسطوانة إلى ارتفاع ضغط الغازات فيها ، مما يسبب حركة الكباس إلى أسفل . وتتغير هذه الحركة الخطية إلى حركة دورانية بواسطة العمود المرفقى ، وبذلك يعمل المحرك فى نفس دورة الحركة بصورة متتابعة . وبالطبع فإن كثيرًا من التفاصيل الميكانيكية ، كالصمامات وشمعات الاشتعال ، غير مبينة بالرسم . ومع ذلك فإن السمة الأساسية لهذا المحرك هى تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية .

ويوضح الشكل 4-13 ب تمثيلاً عامًا للمحرك الحرارى . ويمكن تلخيص خطوات تحويل الحرارة إلى شغل بالاستعانة بهذا الشكل كالتالى . تنساب كمية من الحرارة Q_h من خزان حرارى ذى درجة حرارة مرتفعة (ساخن) إلى المحرك ، وهذا هو دخل الطاقة للمحرك . وبعمل المحرك يتحول جزء من دخل الطاقة إلى شغل ميكانيكى ، وينساب الجزء الباقى Q_c (العادم الحرارى) إلى خزان حرارى ذى درجة حرارة منخفضة (بارد) . وعادة يكون الهواء هو الخزان البارد للمحرك ، كما فى حالة السيارة حيث تخرج العوادم الغازية الساخنة إلى الهواء عن طريق ماسورة السحب (الشكمان) .

ونظرًا لأن المحرك يجب أن يخضع لقانون بقاء الطاقة ، فإن تطبيق القانون الأول للديناميكا الحرارية عليه بالنسبة لدورة واحدة من حركته يعطينا :

$$Q_{\text{net}} = Q_h - Q_c = W + \Delta U$$

حيث W خرج شغل المحرك لكل دورة . ولكن صافى التغير فى الطاقة الداخلية خلال دورة ديناميكية حرارية كاملة يساوى صفرًا ، $\Delta U = 0$ ، فإن المعادلة السابقة تتحول إلى الصورة :

$$W = Q_h - Q_c$$

وسوف نستخدم الآن هذه العلاقة لحساب كفاءة المحرك . من المعروف أن كفاءة أى آلة تساوى نسبة خرج الشغل إلى دخل الطاقة . وبذلك يمكننا كتابة الكفاءة فى هذه الحالة على الصورة :

$$\text{الكفاءة} = \frac{W}{Q_h}$$

وبالتعويض عن W بالقيمة المعطاة عاليه نجد أن :

$$\text{الكفاءة} = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \qquad (13\text{–}3)$$

وهكذا نرى أن العادم الحرارى ، الذى يمثل الطاقة الحرارية التى لم تتحول إلى شغل ، مسئولة عن عدم كفاءة المحرك الحرارى .

وإذا أمكننا أن نجعل Q_c صفرًا ستكون كفاءة المحرك 100 فى المائة ، ولكننا سوف نستخدم الآن مفهوم الأنتروبيا لإثبات أن هذا مستحيل ، وأن هناك حدًا أعلى لا يمكن أن تزيد عنه كفاءة أى محرك حرارى .

سوف نقوم بحساب التغير فى أنتروبيا النظام المبين بالشكل 4-13 ب أثناء انسياب الحرارة إلى المحرك ومنه . ونظرا لأن المحرك يظل كما هو دون تغير تحت تأثير الانسياب الحرارى فإن أنتروبيا المحرك نفسه لا تتغير . ومع ذلك فإن الخزان الحرارى الساخن يفقد كمية قدرها Q_h من الحرارة ، كما أن الخزان البارد يكتسب كمية قدرها Q_c من الحرارة . إذن :

$$\Delta S_h = \frac{-Q_h}{T_h} \qquad \text{و} \qquad \Delta S_c = \frac{Q_c}{T_c}$$

ولكن القانون الثانى ينص على أن التغير الكلى فى الأنتروبيا يجب أن يكون أكبر من أو يساوى الصفر ، إذن :

$$\Delta S_c + \Delta S_h \geqslant 0$$

$$\frac{Q_c}{T_c} - \frac{Q_h}{T_h} \geqslant 0$$

وبنقل الحد السالب إلى الطرف الآخر والقسمة على Q_h ثم الضرب فى T_c نحصل على :

$$\frac{Q_c}{Q_h} \geqslant \frac{T_c}{T_h} \qquad (13\text{–}4)$$

الآن يمكننا التعويض بهذه القيمة فى المعادلة (3-13) لنجد أن :

$$\text{الكفاءة} \leqslant 1 - \frac{T_c}{T_h} \qquad (13\text{–}5)$$

أى ان الكفاءة القصوى ، طبقًا للمعادلة (5-13) ، هى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1 - \frac{T_c}{T_h} \qquad (13\text{–}6)$$

وهكذا يصل بنا التحليل السابق إلى هذه النتيجة المروعة : هناك حد أقصى لكفاءة المحرك الحرارى ، حتى أفضل المحركات الحرارية تصميمًا ، وتعتمد الكفاءة القصوى على درجتى الحرارة التى يعمل بينها هذا المحرك . ويمكننا أن نرى من المعادلة (6-13) أن الكفاءة القصوى يمكن أن تزداد إما بالحصول إلى Q_h من خزان حرارى ذى درجة حرارة عالية جدًا ، أو بصرف Q_c إلى خزان حرارى ذى درجة حرارة منخفضة جدًا . لاحظ أنه إذا أمكن صرف Q_c عند 0 K فقط فإن المحرك يمكن أن يعمل بكفاءة قدرها 100 فى الماء ، محولاً بذلك كل دخل الحرارة إلى شغل وحيث أن درجة الفضاء الخالى فى الكون تساوى 3 k تقريبًا ، فإن هذه الآلة مستحيلة . هذه نتيجة مباشرة للقانون الثانى للديناميكا الحرارية ، وهى تستخدم عادة كصيغة أخرى للقانون الثانى :

الجهاز الذى يحول 100 فى المائة من دخل الحرارة إلى شكل ميكانيكي مستحيل فيزيائيا .

رأينا في الفصل الثاني عشر كيف يمكن حساب الشغل والحرارة المتنقلة خلال دورة ديناميكية حرارية باستخدام الرسم البيانى PV للعمليات المتضمنة فى الدورة . وقد أثبت سادى كارنو ـ أحد الرواد في مجال الديناميكا الحرارية ـ أن الكفاءة العظمى المعطاة بالمعادلة (13-6) يمكن أن يحققها محرك مثالى واحد تتكون دورته من التمددات والانضغاطات الأيسوثرمية والأدياباتية فقط للغازات المثالية ، ويعرف هذا المحرك باسم **محرك كارنو** . أما كفاءة المحركات الحرارية الحقيقية فتبعد كثيرًا عن الكفاءة القصوى النظرية لأسباب كثيرة كالاحتكاك وفواقد أخرى متعددة للحرارة . فكفاءة محرك السيارة مثلاً يساوى 25 فى المائة تقريبًا ، بالرغم من الكفاءة النظرية القصوى طبقًا لدرجتى الحرارة التى يعمل بينهما المحرك يجب أن تكون 80 فى المائة . كذلك فإن الكفاءة القصوى للتوربينات البخارية المستخدمة فى توليد الكهرباء تتراوح بين 60 و 65 فى المائة تقريبًا ، ولكنها فى الحقيقة تحول حوالى 45 فى المائة فقط من الطاقة الحرارية لبخار الماء الساخن المستمد من الغلايات إلى شغل ميكانيكى يستخدم فى إدارة المولدات .

من الممكن تحويل الطاقة الحرارية عالية درجة الحرارة إلى شغل بكفاءة أكبر مما فى حالة الطاقة الحرارية منخفضة درجة الحرارة . ولهذا السبب تؤخذ درجة الحرارة عادة كمقياس **لجودة الطاقة الحرارية** . وإذا وجدت مادتان عند درجتى حرارة مختلفتين فإنهما يمثلان نظامًا ديناميكيًا حراريًا أكثر نظامًا من النظام الديناميكى الحرارى الناتج بعد أن تتبادل المادتان الحرارة فيما بينهما ووصولهما إلى درجة حرارة الاتزان . كذلك يمثل الشغل حالة عالية النظام للسلوك الجزيئى (عند حركة جميع الجزيئات فى نفس الاتجاه مثلاً) ، ومن ثم فإنها حالة منخفضة الأنتروبيا . وبناء على ذلك يمكننا اعتبار أن محرك كارنو هو المحرك الحرارى الذى يؤدى إلى زيادة الأنتروبيا بأقل قدر ممكن . أما إذا خلطت الطاقة الحرارية مرتفعة درجة الحرارة ببساطة بالطاقة الحرارية منخفضة درجة الحرارة دون توليد الشغل الميكانيكى ، سوف تزداد الأنتروبيا بالقيمة القصوى . وبمجرد أن يحدث ذلك سوف تُفقد الفرصة فى الحصول على شغل ديناميكى من هذا النظام الديناميكى الحرارى المنظم أصلاً إلى الأبد .

مثال 13-3 :

يستخدم توربين بخارى فى محطة لتوليد الكهرباء تعمل بالفحم فى إدارة المولد الكهربائى . ويستقبل التوربين بخار الماء عند درجة 800 K ويصرفه كعادم عند درجة 300 K . لنعتبر محطة مصممة لتوليد القدرة الكهربائية بمعدل قدره 1000 ميجاوات (MW) . فإذا كان التوربين يعمل بالكفاءة النظرية القصوى ، فما هو معدل صرف العادم الحرارى ؟

1

استدلال منطقى :

سؤال : بم تتعين الكفاءة القصوى للتوربين ؟

الإجابة : بدرجتى الحرارة التى يعمل بينهما التوربين ، طبقًا لتحليل كارنو (المعادلة 6-13) :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

سؤال : ما هى علاقة الكفاءة القصوى للتوربين بمعدل صرف العادم الحرارى ؟

الإجابة : الكفاءة تساوى النسبة بين الشغل الناتج (الخرج) ودخل الحرارة Q_h كذلك يخبرنا القانون الأول للديناميكا الحرارية أيضًا أن $Q_h = W + Q_c$. حيث Q_c العادم الحرارى . وهاتان العلاقتان يمكن التعبير عنهما بدلالة القدرة .

سؤال : ماذا تمثل الكمية 1000 MW ؟

الإجابة : خرج القدرة الكهربائية المتاحة لبذل الشغل .

سؤال : ما علاقة درجتى الحرارة اللتين يعمل بينهما التوربين بالشغل W وكمية الحرارة Q ؟

الإجابة :

$$1-\frac{T_c}{T_h}=\frac{W}{Q_h}=\frac{W}{W+Q_c}=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{waste}}$$

الحل والمناقشة : لنحسب أولاً الكفاءة القصوى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1-\frac{300\text{ K}}{800\text{ K}} = 0.625 = 62.5\%$$

(تذكر دائمًا أن تستخدم درجات الحرارة مقدرة على مقياس كلفن) . إذن :

$$0.625=\frac{P_{out}}{P_{out}+P_{waste}}$$

ومنه نحصل على :

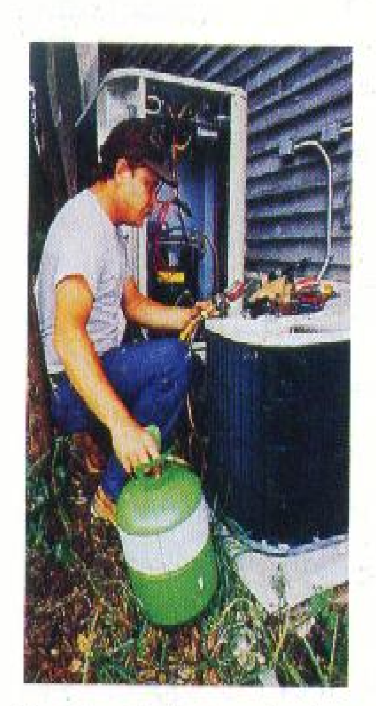
$$P_{waste}=\frac{P_{out}}{0.625}-P_{out}=\frac{1000\text{ MW}}{0.625}-1000\text{ MW}=1600\text{ MW}$$

هذا يعنى أنه يجب إمداد التوربين بالطاقة فى صورة بخار ذى درجة حرارة عالية بمعدل قدره 1000 MW + 1600 MW = 2600 MW .

تمرين : كفاءة المحركات البخارية الحديثة حوالى 45 فى المائة . ما هما القيمتان الواقعيتان لمعدلى صرف العادم الحرارى ودخل الحرارة لمثل هذا التوربين ؟

الإجابة : $P_{waste} = 2200\text{ MW}$ و $P_{in} = 3200\text{ MW}$. **لاحظ أن انخفاض الكفاءة بنسبة 17.5 فى المائة يؤدى إلى زيادة العادم الحرارى بنسبة 39 فى المائة لنفس مستوى خرج القدرة .**

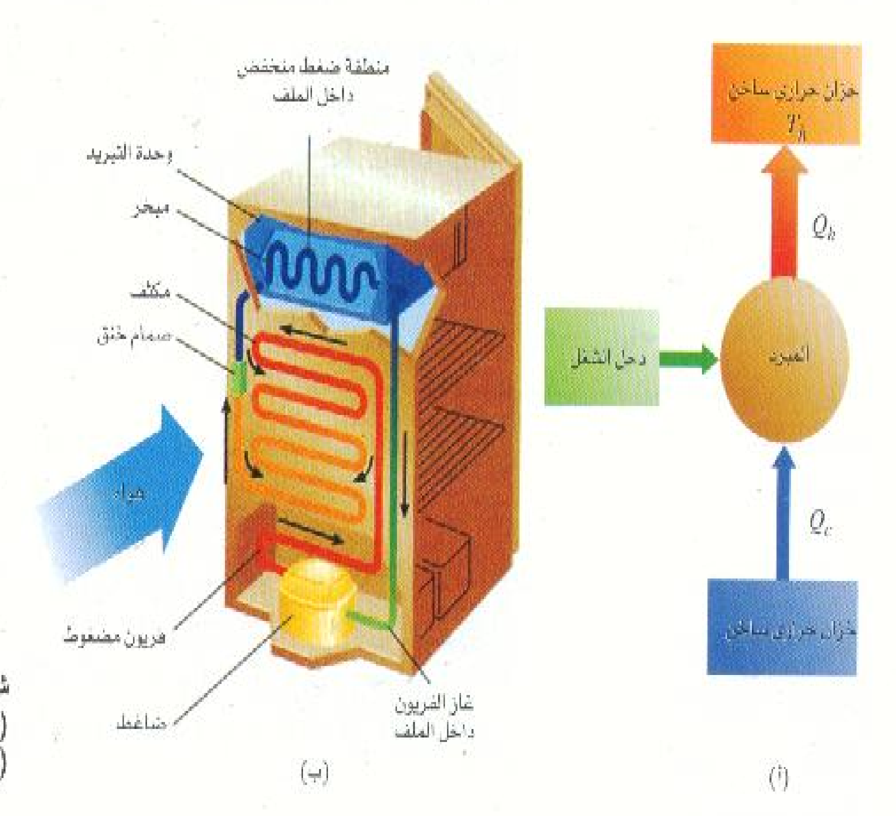
13-4 أنظمة التبريد



يقوم فني التبريد باختبار وضبط كمية الفريون في جهاز تكييف الهواء المبين بالصورة . الضاغط هو الجسم الأسود في خلفية الصورة . يوجد أحد المبادلات الحرارية ، بما فيه المروحة ، داخل الوحدة الزرقاء الظاهرة في مقدمة الصورة .

هناك حالات كثيرة يكون المطلوب فيها تبريد مادة ما بدون خلطها مع مادة أخرى أبرد منها ، وليس استخلاص الشغل من الطاقة الحرارية . والقانون الثاني لا يسمح بحدوث ذلك تلقائيًا لأن هذه العملية تتطلب أن يصبح الجسم البارد أكثر برودة من الوسط المحيط به . ومع أن القانون الثاني يحرم انسياب الحرارة من الجسم البارد إلى الساخن ، يمكننا بذل شغل على النظام لإجبار الحرارة على « صعود تل » درجات الحرارة ، وهو ما يشبه إلى حد كبير ضخ الماء إلى أعلى ضد الجاذبية وتسمى العملية التي يستخدم فيها الشغل لخفض درجة حرارة المادة **بدورة التبريد** ، وهذه في الحقيقة هي أساس عمل العديد من أنظمة التبريد كالمبردات (الثلاجات) وأجهزة تكييف الهواء والمضخات الحرارية .

وفي دورة التبريد يتم انسياب الطاقة أساسيًا في عكس اتجاه انسيابها في المحرك الحراري ، كما هو مبين بالشكل 5-13 أ . فإذا كانت دورة التبريد تتم بين درجتي الحرارة العالية T_h والمنخفضة T_c سنجد أن دخل الشغل W سوف يسمح للجهاز بانتزاع كمية من الحرارة Q_c عند درجة الحرارة المنخفضة وصرف كمية من الحرارة Q_h كعادم حراري عند درجة الحرارة العالية . ومرة ثانية فإن القانون الأول للديناميكا الحرارة يتطلب أن تتساوى كمية الطاقة الداخلة مع كمية الطاقة الخارجة ، أو :



شكل 5-13:
(أ) انسياب الحرارة في نظام تبريد .
(ب) رسم تخطيطي لمبرد (ثلاجة) .

$$Q_c + W = Q_h \qquad (13\text{–}7)$$

يمثل الشكل 5-13 ب رسمًا تخطيطيًا لثلاجة منزلية . ويتم التبريد فى مثل هذا النوع من الأجهزة باستخدام سائل ذى نقطة غليان منخفضة كالفريون الذى يغلى عند درجة $-30°C$ عند الضغط الجوى . لنتتبع الآن دورة التبريد فى هذه الثلاجة . فى بداية الدورة يقوم الضاغط الموجودة بالجزء السفلى من وحدة التبريد بضغط غاز الفريون إلى ضغط عال بدرجة تكفى لإسالته عند تبريده قليلاً . وأثناء هذا الانضغاط الأدياباتى تقريبًا يسبب الشغل W المبذول على الغاز تسخينه بدرجة كبيرة . وبعدئذ يمر الفريون الساخن فى ملفات المكثف ، حيث يفقد بعضًا من حرارته عند درجة الحرارة العالية إلى الهواء المحيط . (عندما تقترب من ظهر الثلاجة يمكنك الإحساس بسخونة الهواء قرب الملفات) . وتؤدى عملية تبريد الفريون هذه إلى تحوله إلى الطور السائل نتيجة فقده لحرارة تبخيره إلى الهواء المحيط . لاحظ أن الحرارة المفقودة أثناء التبريد وأثناء التحول الطورى تمثل جزءًا من Q_h . وبعد انخفاض درجة حرارة الفريون السائل إلى ما يقرب من درجة الغرفة يمر هذا الفريون السائل خلال ملف الخنق حيث يتبخر لتمدده فى منطقة منخفضة الضغط تسمى **المبخر** . (انظر المثال التوضيحى 3-12) . وبمرور الفريون الغازى ، الذى أصبح الآن باردًا جدًا ، فى الأنابيب الملتوية للمبخر سوف تنساب كمية من الحرارة Q_c من محتويات المبرد الدافئة إلى الفريون ، مما يؤدى إلى تبريد داخل الثلاجة . وأخيرًا يترك الفريون الغازى (بعد أن أصبح دافئًا) ، أنابيب المبخر عائدًا مرة أخرى إلى الضاغط حيث تتكرر دورة التبريد مرة أخرى .

وتعمل أجهزة تكييف الهواء بنفس هذه الطريقة . ولكن ملفات التبريد توجد فى هذه الحالة داخل المنزل . بينما توجد ملفات التكثيف فى الخارج . وبذلك تنقل الحرارة من داخل المنزل إلى خارجه ، وهذا يؤدى إلى تبريد الداخل وتسخين الخارج . (ضع يدك بالقرب من جهاز التكييف خارج المنزل وسوف تشعر بالحرارة المنصرفة Q_h) .

تبين المعادلة (7-13) أن $Q_h > Q_c$ بكمية تساوى الشغل المبذول بواسطة الضاغط :

$$W = Q_h - Q_c$$

ولقياس فاعلية المبرد سوف نعرف **معامل الأداء COP** بأنه النسبة بين كمية الحرارة المنتزعة عند درجة الحرارة المنخفضة ودخل الشغل اللازم :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W} \qquad (13\text{–}8)$$

وباستخدام المعادلة (6-13) لحذف W نحصل على :

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{Q_h - Q_c} \qquad (13\text{–}9)$$

لاحظ من المعادلة (9-13) أن قيمة COP ـ نسبة الحرارة المنتزعة إلى دخل الشغل ـ أكبر دائمًا من 1 . هذا يوضح أن كمية صغيرة من الشغل يمكنها انتزاع كمية أكبر من الحرارة .

وكما فعلنا في حالة المحرك الحراري ، يمكننا استخدام اعتبارات الأنتروبيا بالقانون الثاني للتعبير عن كميتي الحرارة المتنقلتين بدلالة درجتي حرارة الخزانين الحراريين اللتين يتم عندهما التبادل الحراري . وعندئذ سنجد أن معامل الأداء الأقصى لمبرد يعطى بالعلاقة :

$$\text{COP} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad \text{(الأقصى)} \qquad (13\text{-}10)$$

لاحظ أن أفضل أداء (أعلى COP) يتحقق عندما يكون الفرق بين درجتي الحرارة صغيرًا . وهذا معقول لأن الشغل اللازم لإجبار الحرارة على الانسياب إلى خزان حراري ذى درجة حرارة أعلى قليلاً سيكون أصغر مما في حالة انتقال الحرارة إلى خزان حراري ذى درجة حرارة أعلى بكثير .

تعتبر المضخات الحرارية مثالاً آخر لاستخدام دورة التبريد . وتصنع هذه بحيث تحتوى على مجموعتين من ملفات التبريد ، مما يسمح باستخدام المضخة الحرارية كمكيف للهواء ، حيث توجد ملفات المبخر داخل المنزل ، أو كوحدة تدفئة حيث توجد ملفات المكثف داخل المنزل وبالتالى يصرف العادم الحراري داخل الغرفة . وفى الحالة الأخيرة يتم تسخين المبنى بواسطة الطاقة الحرارية المنتزعة من الجو الخارجي البارد بعد رفع درجة حرارتها تحت تأثير الشغل المبذول بواسطة الضاغط .

ويختلف الغرض من استخدام المضخات الحرارية للتدفئة اختلافًا بسيطًا عن جهاز تكييف الهواء . ذلك أن وظيفة المضخة الحرارية هى نقل الحرارة Q_h إلى المنزل بدلاً من انتزاع الحرارة Q_c . وحيث أن COP مؤشر ومقياس لفاعلية أداء الجهاز للوظيفة المطلوبة منه ، يجب تعريف COP للمضخة الحرارية بالطريقة الآتية :

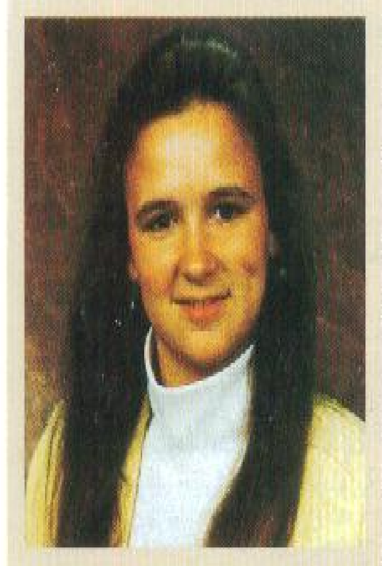
$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W} = \frac{Q_h}{Q_h - Q_c} \quad \text{(للمضخة الحرارية)} \qquad (13\text{-}11)$$

وبذلك يأخذ COP الأقصى للمضخة الحرارية الصورة :

$$\text{COP} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad \text{الأقصى (للمضخة الحرارية)} \qquad (13\text{-}12)$$

لاحظ الفرق البسيط بين المعادلتين (11-13) و (12-13) للمضخة الحرارية والمعادلتين (9-13) و (10-13) للمبرد .

الفيزيائيون يعملون كارين سان جيرمان ، جامعة نبراسكا ، لينكولن



عملت خلال السنوات الست الأخيرة في مجال يسمى « الاستشعار عن بعد » ، وهو مجال فيزيائي في جزء منه وهندسي في الجزء الآخر . ويمكن تعريف الاستشعار عن بعد عمومًا بأنه جمع المعلومات الفيزيائية عن جسم أو موقع دون الاضطرار إلى الانتقال إلى ذلك الجسم أو الموقع .

وتتلخص إحدى الطرق المستخدمة لهذا الغرض في إرسال الطاقة الكهرومغناطيسية ثم استقبالها بعد انعكاسها على الجسم (أو الأجسام) . ومن الأمثلة التطبيقية المألوفة لهذه الطريقة يمكننا ذكر الصور الرادارية التي نشاهدها في نشرات الطقس المسائية على شاشة التليفزيون . حيث تكون الأجسام العاكسة هنا هي قطرات المطر ، وتكون المعلومات المطلوبة هي كمية المطر المتوقع وتعتمد الطريقة الثانية للاستشعار عن بعد ببساطة على قياس الإشعاع الطبيعي المنبعث من الجسم أو المنظر موضع الاهتمام باستخدام أجهزة تسمى الراديومترات (مقاييس الإشعاع) . وربما كان أشهر أمثلة هذا النوع من الاستشعار عن بعد هو جهاز استقبال الأشعة تحت الحمراء المستخدم لقياس درجة الحرارة الفيزيائية للمنظر ، والمستخدم في أجهزة الرؤية الليلية لرؤية الأجسام الدافئة ، كالأشخاص (تذكر نظارات الأشعة تحت الحمراء المستخدمة في فيلم **سكوت الحملان** ؟) والحيوانات والآلات .

وفي الوقت الحالي تنحصر اهتماماتي بالمشاركة في دراسة البيئة الأرضية باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد للإجابة عن مختلف الأسئلة الجيوفيزيائية ، وهذا يتضمن كلاً من الاهتمامات قصيرة المدى كالإنذار المبكر عن الكوارث الطبيعية ، وطويلة المدى كالدراسات المناخية والاستيطانية .

كان بحثي الأول في مشروع التخرج ينتمي إلى مجموعة بحوث الاستشعار عن بعد القريبة المدى ، وهو بحث متعلق بصعوبة التنبؤ بكيفية تزايد شدة الأعاصير المتحركة بسرعة كبيرة فوق المحيط وتوقيت وصولها إلى البر . وفي الوقت الحالي تصدر الإنذارات عن الأعاصير التي تصل فعلاً إلى البر وعلى بعد 300 ميلاً في المتوسط عن خط الشاطئ ، بتكاليف قدرها 30.000 $ لكل ميل . ومع ذلك فإن تحسين مثل هذا التنبؤ بنسبة 10 في المائة فقط لعاصفة واحدة يمكن أن يوفر المال اللازم لتمويل أبحاث الأعاصير لسنة كاملة .

تقول تقارير مركز أبحاث الأعاصير* إن مفتاح المعلومات المفقودة هو سرعة الريح عند سطح المحيط . ومن الطبيعي أنه يمكن قياس سرعة الريح بإرسال سفينة لقياسها أثناء العاصفة ، ولكن هذه الطريقة في منتهى الخطورة لأسباب واضحة . كذلك فإن استعمال طائرات الاستطلاع لقياس سرعة الريح على ارتفاعات صغيرة فوق سطح البحر أمر لا يخلو أيضًا من الخطورة . ولهذا فإن الحل المعقول لهذه المشكلة هو استخدام مبادئ الاستشعار عن بعد بتصميم راديومتر مناسب يمكن تركيبه بحيث يكون موجهًا إلى أسفل في باطن الطائرة من الخارج . هذا الجهاز يقوم بقياس الإشعاع الطبيعي الآتي من المحيط ، والذي يرتبط ارتباطًا مباشرًا بدرجة تموج وخشونة سطحه ، وهذه بدورها تعتمد على سرعة الرياح بالقرب من السطح . وبعد اختبار هذه الفكرة لعدة فصول متعاقبة يمكننا الآن قياس السرعة السطحية للإعصار بنجاح أثناء طيران طائرات الاستطلاع على الارتفاعات المأمونة . ويعود الفضل لهذا المشروع في قيامي بالطيران خلال أول إعصار في حياتي - إعصار جيلبرت في خريف 1988 ؛ ويمكنني أن أؤكد لكم أنه كان أكثر متعة وحيوية من ركوب الأفعوانية في مدينة الملاهي .

* Hurricane Research Center .

من الواضح إذن أن الهدف من بحثى فى مجال الأعاصير هو تحسين التنبؤ بشدة الأعاصير وتوقيت وصولها إلى اليابسة ، ولكن موضوع الاستشعار عن بعد يهتم فى المقام الأول بأهداف بعيدة المدى للدراسات البيئية . فمع زيادة الاهتمام بتغير المناخ على سطح الأرض عمومًا والمناقشات المستفيضة عن ظاهرة البيوت الزجاجية أصبح من المقبول علميًا أن مساحة المنطقة الثلجية وسمك الثلج فى المناطق القطبية يجب أن يكون حساسًا حتى للتغيرات الطفيفة فى متوسط درجة الحرارة على سطح الأرض . ورغم أن الأقمار الصناعية تمدنا يوميًا بقياسات عديدة لاتساع نطاق الثلج القطبى ، فإن سمك الطبقة الثلجية مازال محيرًا . ومع ذلك فإن لدينا برهانًا معمليًا على أن الإشعاع الدقيق الطبيعى المنبعث من الثلج الطافى على الماء مرتبط بسمك الثلج ؛ وهذا يدل على أن قياس الإشعاع الطبيعى للثلج فى المناطق القطبية باستعمال الأقمار الصناعية سوف يمكننا من رسم خريطة تفصيلية لسمك الثلج فى تلك المناطق .

ولكن قبل البدء فى هذا المشروع الضخم باستخدام الأقمار الصناعية كان من الضرورى إجراء دراسات ميدانية « لاختبار صحة المفهوم » . وفى يوليو من عام 1989 قمنا بتركيب راديومتر فائق الحساسية على جانب كاسحة جليد ألمانية مخطط لقيامها برحلة إلى القارة القطبية الجنوبية فى أغسطس التالى . وبينما كانت السفينة تتحرك خلال ثلج البحر ، كان الراديومتر يقوم بقياس الإشعاع الذى قورن بنجاح فيما بعد بالقياسات الفعلية للسمك ، وكانت النتائج رائعة حقًا . وبالإضافة إلى ما أنجزته فى هذا المشروع من أهدافى البحثية ، كانت هذه فرصة ذهبية لى للتعرف والتعامل مع علماء من ألمانيا وروسيا وكولومبيا والولايات المتحدة وكندا . وحيث أن هذا الوقت من السنة كان فصل الربيع فى نصف الكرة الجنوبى فقد تمتعنا بمظاهر الطبيعة الخلابة هناك ممثلة فى طيور البطريق الأباطرة وعجول البحر (الفقمات) والحيتان القاتلة وطيور النوء الجميلة . وختامًا لهذه الرحلة البحثية الناجحة ؛ بعد وصولنا إلى إحدى موانئ أفريقيا ؛ قمنا مع بعض أصدقائنا الجدد برحلة رائعة فى برارى أفريقيا .

إن حبى لفهم سلوك الأشياء هى ما جذبنى أصلاً إلى الفيزياء والهندسة ، ولم أكن أتوقع إطلاقًا مدى المتعة والإثارة فى السعى وراء مثل هذا الفهم . وإننى أعنى بذلك الرحلات المرتبطة بالبحوث الميدانية وحرية الاتصال بالهيئات العلمية ذات الشهرة العالمية مثل NASA والعمل مع علماء فى تخصصات أخرى ونمو معرفتى شيئًا فشيئًا عن الدورات المناخية والأعاصير وطيور البطريق .

مثال توضيحى 1-13

ما هى كمية الشغل اللازم بذله على مضخة حرارية لنقل كمية قدرها 1000 J من الحرارة إلى داخل غرفة ، إذا كانت درجة حرارة المكثف 40°C ودرجة الحرارة بالخارج 0°C ؟ افترض أن المضخة الحرارية تعمل بأقصى COP (وهذا مستحيل فى الحقيقة) .

استدلال منطقى : فى هذه الحالة $T_h = 313\ \text{K}$ و $T_c = 273\ \text{K}$. وبذلك يكون COP الأقصى لهاتين القيمتين من درجة الحرارة :

$$\frac{313\ \text{K}}{313\ \text{K} - 273\ \text{K}} = 7.8$$

وهذه القيمة تمثل نسبة كمية الحرارة المنقولة Q_h إلى دخل الشغل W . وحيث أن $Q_h = 1000\ \text{J}$ ، إذن :

$$W = \frac{Q_h}{\text{COP}} = \frac{1000\ \text{J}}{8.7} = 130\ \text{J}$$

أى أن المضخة الحرارية تنقل إلى الغرفة كمية من الحرارة قدرها 7.8 ضعفًا قدر الشغل المستهلك فى صورة الكهرباء اللازمة لعمل الضاغط . هذا فى حالة المضخة الحرارية المثالية . أما بالنسبة إلى المضخات الحرارية الفعلية التى تعمل بين نفس درجتى الحرارة فإن COP يساوى 3–4 فقط ، ولذلك فإنها تستهلك كمية أكبر من الشغل .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الأنتروبيا ، (ب) الحالة الميكروئية والحالة الماكروئية ، (جـ) محرك كارنو ، (د) المحرك الحرارى ، (هـ) أنظمة التبريد ، (و) كفاءة المحرك الحرارى ، (ز) معامل أداء نظام التبريد .

2 ـ إعطاء بعض الأمثلة للأنظمة الفيزيائية التى تصبح غير منظمة إذا تركت لحالها . اشرح لماذا لا تشاهد العملية العكسية فى كل حالة .

3 ـ التغير فى أنتروبيا نظام بسيط أثناء تغير أيسوثرمى .

4 ـ شرح العلاقة بين الانتروبيا والاحتمالية ، واستخدام علاقة بولتزمان لحساب الأنتروبيا وتغير الأنتروبيا للأنظمة البسيطة .

5 ـ ذكر القانون الثانى للديناميكا بدلالة (أ) اتجاه سريان الحرارة بين نظامين مختلفين فى درجة الحرارة ، (ب) ظاهرة الاتزان الديناميكى الحرارى ، (جـ) درجة النظام فى النظام الديناميكى الحرارى ، (د) تحول الحرارة إلى شغل بواسطة المحرك الحرارى .

6 ـ تعريف المحرك الحرارى ونظام التبريد بدلالة الوظيفة وانسياب الحرارة .

7 ـ إجراء الحسابات البسيطة باستخدام مفهومى الكفاءة ومعامل الأداء .

8 ـ التعرف على مركبات دورة التبريد . شرح الفرق بين تطبيقات دورة التبريد فى المبردات وأجهزة تكييف الهواء والمضخات الحرارية .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

القانون الثانى للديناميكا الحرارية

1 ـ تنتقل الحرارة دائمًا من درجة الحرارة العالية إلى درجة الحرارة المنخفضة .

2 ـ يميل النظام المعزول إلى الحالة ذات أعلى درجة من اللانظام (الفوضى) . هذه أيضًا هى الحالة ذات أعلى احتمالية .

3 ـ عندما تتغير حالة نظام معزول يكون التغير فى الأنتروبيا أكبر من أو يساوى الصفر .

4 ـ من المستحيل للمحرك الحرارى تحويل الطاقة الحرارية إلى شغل بكفاءة قدرها 100% .

الأنتروبيا (S)

الأنتروبيا دالة للحالة الديناميكية الحرارية ، وتعرف بدلالة احتمالية Ω حدوث حالة معينة :

$$S = k \ln \Omega$$

تزداد الأنتروبيا عند إضافة الحرارة إلى النظام وتقل عند فقده لها . يعطى تغير الأنتروبيا فى العمليات الأيسوثرمية بالعلاقة :

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \qquad \text{(للعمليات الأيسوثرمية)}$$

الوحدات SI للأنتروبيا هى J/K .

كفاءة المحرك الحرارى

$$\text{الكفاءة} = \frac{\text{الشغل}}{\text{دخل الحرارة}} = \frac{W}{Q_h}$$

الكفاءة القصوى لمحرك حرارى يعمل بين درجتى الحرارة T_c ، T_h هى :

$$\text{الكفاءة القصوى} = 1 - \frac{T_c}{T_h}$$

معامل أداء المبرد والمضخة الحرارية

$$\text{COP} = \frac{Q_c}{W_{in}} \quad (\text{للمبرد})$$

$$\text{COP} = \frac{Q_h}{W_{in}} \quad (\text{للمضخة الحرارية})$$

معامل الأداء الأقصى لمبرد ومضخة حرارية يعملان بين درجتى الحرارة T_c ، T_h هما :

$$\text{COP}_{\text{الأقصى}} = \frac{T_c}{T_h - T_c} \quad (\text{للمبرد})$$

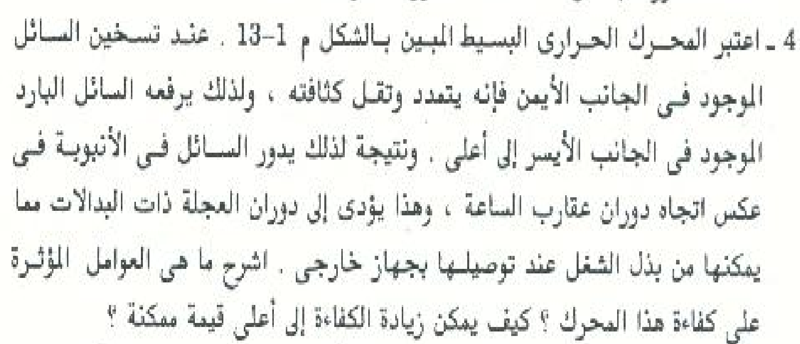
$$\text{COP}_{\text{الأقصى}} = \frac{T_h}{T_h - T_c} \quad (\text{لمضخة حرارية})$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ افترض أن لديك صندوقًا مفرغًا تفريغًا جيدًا يحتوى على خمسة جزيئات فقط من غاز ما ، ويحدث أحيانًا أن تتواجد كل هذه الجزيئات الخمسة فى أحد نصفى الصندوق كيف يمكنك التوفيق بين هذا الموقف والقانون الثانى ومناقشتنا عن اللانظام .

2 ـ يدعى بعضهم أن بالإمكان تبريد بطيخة بلفها فى بطانية مبللة وتركها فى النسيم حتى إذا كانت درجة الحرارة عالية . ألا يتناقض هذا مع القانون الثانى ؟

3 ـ قدر معدل تغير أنتروبيا شخص عندما يتسكع هنا وهناك . متوسط معدل الأيض (التمثيل الغذائى ؛ أى معدل استهلاك الطاقة المخزونة) للفرد تحت هذه الظروف حوالى 100 W .



شكل م1-13

4 ـ اعتبر المحرك الحرارى البسيط المبين بالشكل م 1-13 . عند تسخين السائل الموجود فى الجانب الأيمن فإنه يتمدد وتقل كثافته ، ولذلك يرفعه السائل البارد الموجود فى الجانب الأيسر إلى أعلى . ونتيجة لذلك يدور السائل فى الأنبوبة فى عكس اتجاه دوران عقارب الساعة ، وهذا يؤدى إلى دوران العجلة ذات البدالات مما يمكنها من بذل الشغل عند توصيلها بجهاز خارجى . اشرح ما هى العوامل المؤثرة على كفاءة هذا المحرك ؟ كيف يمكن زيادة الكفاءة إلى أعلى قيمة ممكنة ؟

5 ـ لكل نرد (زهر الطاولة) ستة أوجه تحمل نقطًا عددها من 1 إلى 6 . إذا ألقى زوج من النرد على المنضدة ، فما هى النسبة بين احتمال أن يكون مجموع الوجهين x واحتمال أن يكون مجموعهما y عندما :

(أ) $y = 3$ و $x = 2$ ، (ب) $y = 4$ و $x = 2$.

6 ـ أراد طفل تبريد مطبخ منزله ففتح باب الثلاجة الكهربائية وتركه مفتوحًا . هل تنجح هذه الفكرة ؟ أجب عن هذا السؤال من وجهة نظر المدى القريب والمدى البعيد . هل يختلف الموقف إذا استخدمت ثلاجة من النوع القديم (صندوق الثلج) بدلاً من الثلاجة الكهربائية ؟

7 ـ ما زالت الشمس إلى الآن مصدرنا الرئيسي للطاقة التي نستخدمها على الأرض . تتبع هذه الطاقة الشمسية من مصدرها خلال استخداماتنا واثبت عدم وجود أي تناقض مع القانون الثاني . اهتم بشكل خاص بعملية التنظيم التي تحدث في التمثيل الضوئي .

مسائل

القسم 13-1

1 ـ ألقيت ثلاث قطع عملة معدنية ملونة بألوان مختلفة بطريقة عشوائية . (أ) ما عدد الطرق المختلفة لظهور مجموعات الصورة والكتابة على الأوجه العلوية ؟ (ب) ما هي احتمالية ظهور الصورة على جميع الأوجه العلوية ؟ (جـ) ما هي احتمالية ظهور صورتين وكتابة واحدة على الأوجه العلوية ؟

2 ـ ألقي زوج من أحجار النرد على المنضدة . (أ) كم عدد الطرق لأن يكون مجموع الوجهين العلويين 5 ؟ وما هي احتمالية ألا يكون المجموع 5 ؟ (ب) بكم طريقة يمكن أن يكون المجموع 11 ؟ وما هي احتمالية ألا يكون المجموع 11 ؟ (جـ) ما هو المجموع الأكبر احتمالية ؟ ، وما قيمة هذه الاحتمالية ؟

■ 3 ـ دعيت إلى مباراة في النرد على كوكب محايد يستعلمون فيه « نردًا » على هيئة مجسمات ذات أربع أوجه مثلثية تحمل أرقامًا من 1 إلى 4 . وينص قانون هذه المباراة على استعمال **ثلاث** قطع من هذا النرد ، وأن يحسب مجموع الأوجه السفلية بعد كل رمية . (أ) كون جدولاً لاحتمالية كل التوافيق الممكنة لهذه القطع الثلاث . كما عدد الترتيبات المختلفة الممكنة ؟ (ب) ما عدد الطرق التي يمكن أن يكون فيها مجموع الأوجه السفلية 5 ؟ وما عدد الطرق لتكوين مجموع قدره 11 ؟ ما قيمة الاحتمالية في كل من هاتين الحالتين ؟ (جـ) ما هو المجموع الأكبر احتمالاً ، وما قيمة احتمالية هذا المجموع ؟

4 ـ ارسم رسمًا بيانيًا لتوزيع الاحتمالية في مسألتي النرد 3 و 4 بتمثيل احتمالية كل مجموع على المحور الرأسي مقابل المجموع على المحور الأفقي .

■ 5 ـ عند إلقاء عدد قدره N من قطع العملة المعدنية المميزة بعلامات يكون عدد التوافيق الممكنة من الصورة والكتابة 2^N . ما هو عدد التوافيق الممكنة عند استعمال (أ) 3 قطع ، (ب) 5 قطع ، (جـ) 50 قطعة .

6 ـ وقعت تسع نملات في صندوق فلم تجد أمامها إلا أن تتحرك فيه حركة عشوائية . (أ) استخدم الشرح المعطى بالمسألة 5 لتعيين احتمالية أن توجد كل النملات التسع في النصف الأيسر للصندوق . (ب) ما هي احتمالية وجود ثمان نملات في النصف الأيسر وواحدة في النصف الأيمن ؟

القسم 13-2

7 ـ ما مقدار التغير في أنتروبيا g 315 من الزئبق عند تحولها من الطور السائل إلى الطور الصلب عند نقطة انصهاره وقدرها $-39°C$ ؟

8 ـ ما مقدار التغير في أنتروبيا كمية من الماء كتلتها g 2.3 عند تجمدها عند درجة $0°C$ ؟

9 ـ معدل انبعاث الطاقة من شخص بالغ متوسط يجلس ساكنًا لفترة طويلة يساوي W 105 تقريبا . ما معدل تغير أنتروبيا هذا الشخص ؟

10 ـ سخنت خمسة كيلو جرامات من الماء ببطئ من درجة $27°C$ إلى $37°C$. ما هي القيمة التقريبية للتغير في أنتروبيا هذه الكمية من الماء ؟

■ 11 ـ تمددت عينة من الهليوم كتلتها g 9 أيسوثرميًا عند درجة حرارة قدرها $-90°C$ إلى حجم يساوي 3.75 مرة قدر حجمها

الأصلي . ما قيمة التغير في أنتروبيا الـهليوم ؟

■ 12 ـ نظام مكون من إنائين درجة حرارة أولـهما 350 K ودرجة حرارة الآخر 290 K ويحتوي كل منهما علـى 6.5 مولاً من غاز الـهيدروجين H_2 . هذان الإناءان معزولان عزلاً حرارياً جيدًا عن الوسط المحيـط ، ولكنـهما متلامسان أحدهما مع الآخر بحيث يمكن أن تنساب الحرارة بحرية من الإناء الساخن إلى البارد . (أ) أوجد تغير أنتروبيا كل من العينتين بعد أن تنخفض درجة حرارة الإناء الساخن إلى 340 K . كرر الجـزء (أ) عندمـا يكـون الإنـاءان قـد وصلا علـى درجـة حـرارة الاتـزان . (جـ) أوجد التغير الكلي في الأنتروبيا في الجزئين (أ) و (ب) .

■ 13 ـ رجت خمس قطع عملة معدنية في كوب بشدة ثم ألقيت على منضدة . ما هي قيم الأنتروبيا عندما يظـهر علـى الأوجـه العلوية (أ) 1 صورة ، 4 كتابة ، (ب) 3 صورة ، 2 كتابة ، (جـ) 5 صور .

القسم 3-13

14 ـ يستخدم محرك حراري الجزء الداخلي لفرن ساخن درجة حرارته 850°C كخزان للطاقة الحراريـة الساخنة وهـواء درجة حرارته 65°C كخزان بارد . ما هي الكفاءة العظمى للمحرك تحت هذه الظروف ؟

15 ـ في المحركات التوربينية البخارية الحديثة يكون دخل الحرارة على هيئة بخار درجة حرارته حـوالي 600°C ، ويصـرف العادم الحراري إلى مكثف درجة حرارته حوالي 70°C . ما قيمة أكبر كفاءة ممكنة لمثل هذا التوربين البخاري ؟

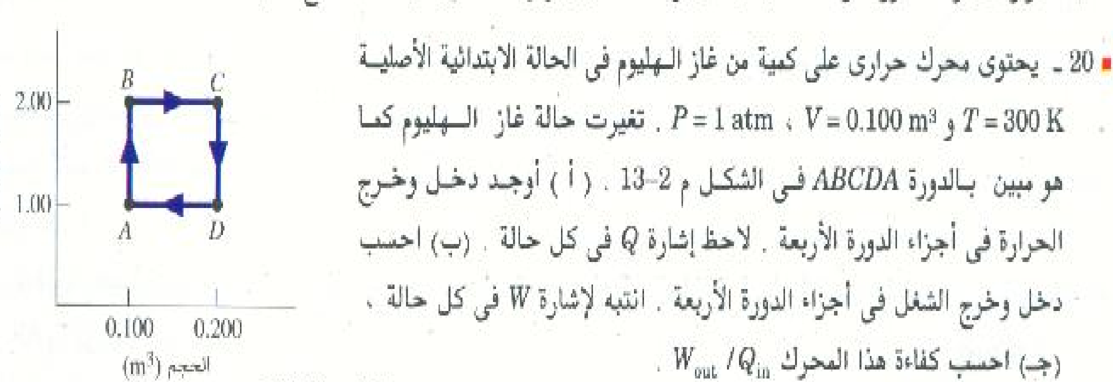
16 ـ تعمل المحركات التوربينية البخارية الفعلية بكفـاءة قدرهـا 46 فـي المائـة تقريبًـا . إذا كـانت قـدره أحـد هـذه المحركـات 500 MW ، (أ) ما هي كمية الحرارة التي يعطيها المحرك إلى الوسط الخارجي ذي درجة الحرارة المنخفضـة خـلال 24 h ؟ (ب) ما هي كمية الطاقة التي يستمدها المحرك من البخار ذي درجة الحرارة العالية خلال نفس الفترة ؟

17 ـ افترض أنك قد تركت مصباحًا كهربائيًا قدرته 100 W مضاء بصفة مستمرة شهرًا كاملاً (30 يومًا) . فإذا كانت مولـدات شركة الكهرباء التي تمد مصباحك بالطاقة تعمل بكفاءة قدرها 30 في المائة ، فما مقدار الطاقة الحرارية المنصرفة إلى البيئة نتيجة لـهذا السهو ؟

■ 18 ـ تتولد الحرارة عند احتراق الجازولين بمعدل قدره 50,000 J/g (هذه الكمية تسمى **حـرارة احـتراق الجـازولين**) . إذا كانت كفاءة محرك سيارة 25 في المائة ، فما هي كمية الجازولين المحترقة في الساعة علمًا بأن قدرة المحـرك 50 hp ؟ عبر عن هذه الإجابة بالكيلوجرامات في الساعة والجالونات في الساعة .

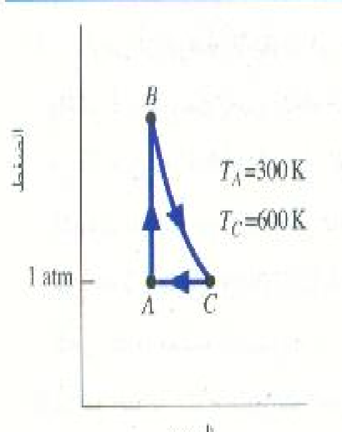
■ 19 ـ الكفاءة الإجمالية لوحدات توليد القدرة النووية الحديثة حوالي 30 في المائة ، بينما تصل الكفاءة الإجمالية للوحـدات التي تعمل بالوقود الأحفوري إلى 40 في المائة نظرًا لارتفاع درجة حرارة البخار المسـتخدم لإدارة التوربينـات قـارن معـدل انبعـاث الحرارة من وحدة نووية ومعدل انبعاثها من وحدة تعمل بالوقود الأحفوري إذا كان خرج قدره كل منهما 1000 MW .

■ 20 ـ يحتوي محرك حراري على كمية من غاز الـهليوم في الحالة الابتدائية الأصليـة $P = 1$ atm ، $V = 0.100$ m³ و $T = 300$ K . تغيرت حالة غاز الـهليوم كمـا هو مبين بالدورة $ABCDA$ في الشكل م 2-13 . (أ) أوجـد دخـل وخـرج الحرارة في أجزاء الدورة الأربعة . لاحظ إشارة Q في كل حالة . (ب) احسب دخل وخرج الشغل في أجزاء الدورة الأربعة . انتبه لإشارة W في كل حالة ، (جـ) احسب كفاءة هذا المحرك W_{out}/Q_{in} .



شكل م 2-13

21 ـ يعمل محرك حرارى يحتوى على 2 mol من غاز مثالى فى الدورة الديناميكية الحرارية الموضحة بالشكل م 3-13 والمكونة من العملية الأيسوكورية AB والعملية الأدياباتية BC والعملية الأيسوبارية CA . (أ) احسب Q و W لكل من هذه العمليات . (ب) احسب كفاءة هذا المحرك . (جـ) احسب الكفاءة القصوى لأى محرك يعمل بين درجتى حرارة هذه الدورة .



شكل م 3-13

القسم 4-13

22 ـ القدرة المطلوبة لكى يعمل مبرد معين تساوى 0.90 kW ، وعندئذ يستطيع هذا المبرد نقل الحرارة من داخله بمعدل قدره 560 cal/s . ما قيمة COP لهذا المبرد ؟ بأى معدل تنطلق الحرارة إلى الحجرة الموجود بها هذا المبرد ؟

23 ـ القدرة المطلوبة لكى يعمل مكيف هواء تساوى 0.90 kW ، وعندئذ ينصرف العادم الحرارى إلى الهواء الطلق بمعدل قدره 560 calories فى الثانية . كم سعرًا ينقله هذا المكيف من الغرفة التى يجرى تبريدها فى الثانية الواحدة ؟ عبر عن هذه النتيجة بالوحدة الحرارية البريطانية فى الساعة . ما قيمة COP لمكيف الهواء ؟

24 ـ لنفرض أن COP لمبرد معين يساوى 5.5 . (أ) ما مقدار الطاقة المستهلكة لإزالة 1850 cal من داخله ؟ (ب) ما قيمة القدرة المقدرة لهذا المبرد إذا كان يستطيع إزالة 1850 cal من داخله كل دقيقة ؟

25 ـ ركب بعضهم مضخة حرارية فى منزلهم فوجد أنه ينقل الحرارة إلى داخل المنزل عند درجة حرارة قدرها 40°C . قارن أكبر COP ممكن لهذه المضخة الحرارية إذا كانت درجة الحرارة الخارجية (أى درجة حرارة الخزان الحرارى البارد) ، (أ) 0°C ، (ب) -30°C .

مسائل عامة

26 ـ وضع طبق طعام ساخن فى مبرد (ثلاجة) درجة حرارته الداخلية 5°C . فإذا كانت كمية الحرارة التى يجب أن يفقدها هذا الطبق لتبريده إلى 5°C تساوى 220,000 J ، (أ) ما هى كمية الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الضاغط إذا كانت درجة حرارة الغرفة 23°C ؟ بفرض أن المبرد يعمل بنصف COP الأقصى النظرى له . (ب) كم يتكلف تبريد الطبق إذا كانت تكاليف الطاقة الكهربائية المستهلكة $0.075/kWh ؟

27 ـ قرر عالم يعيش على كوكب شبيه بالأرض ، ويعلم الكثير من علومها ، بناء مقياس لدرجة الحرارة على أساس مبدأ أقصى تحويل للطاقة الحرارية إلى شغل طبقًا للقانون الثانى للديناميكا الحرارية ، ونحن سكان الأرض نعلم أن هذا المقياس يمكن تعريفه حسب صيغة كارنو للقانون الثانى بالعلاقة $T_h/T_c = Q_h/Q_c$. علاوة على ذلك قرر العالم أن يكون الفرق بين نقطتى غليان وتجمد الماء على هذا المقياس 100 درجة . ومن قياساته على دورة كارنو عند نقطتى غليان وتجمد الماء عند الضغط الجوى لهذا الكوكب وجد العالم أن $Q_h/Q_c = 0.732$. ما قيمة كل من نقطتى الغليان والتجمد للماء على هذا المقياس لدرجة الحرارة ؟ هل يمكنك أن تستنتج أى شىء عن الضغط الجوى فى هذا الكوكب بالمقارنة بالضغط الجوى على الأرض ؟

28 ـ تتسارع سيارة من السكون إلى سرعة قدرها 8.3 m/s خلال 6.6 s . (أ) ما هى أقل قدرة حصانية يجب أن يولدها المحرك إذا كانت جميع فواقد الاحتكاك مهملة ؟ (ب) بفرض أن السيارة تستهلك وقودها بكفاءة قدرها 22 فى المائة ، عين كمية الجازولين المستهلكة خلال فترة زمنية قدرها 6.6 s ، علمًا بأن الحرارة الناتجة عن احتراق جرام واحد من الجازولين 50,000 J .

▪ 29 ـ لنفرض أن درجة الاحتراق فى توربين غازى (T_h) تساوى 2400°C وأن درجة حرارة العادم (T_e) تساوى 400°C ؛ واعتبر أن التوربين يعمل بثلث الكفاءة القصوى المكنة . ولكى لا تضيع حرارة العادم هباء فإنها تستخدم فى إنتاج بخار درجة حرارته 400°C لتشغيل توربين بخارى ذى درجة حرارة منخفضة يعمل بكفاءة قدرها 70 فى المائة من كفاءته القصوى المكنة ويصرف العادم عند درجة 70°C . هذا مثال لما يسمى محرك الدورة الموحدة . (أ) ما كفاءة كل محرك على حدة ؟ ما هى الكفاءة الكلية لتشغيل الدورة الموحدة ؟ (جـ) إذا كان كل من المحركين محرك كارنو مثالى ، فما هى أقصى كفاءة ممكنة للمجموعة ؟

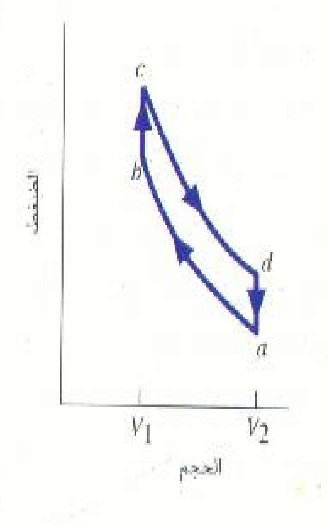
▪ 30 ـ عمم المسألة 29 باعتبارات محركين حراريين مثاليين موصلين على التوالى ، يعمل أحدهما بين درجتى T_1 و T_2 ويعمل الثانى بين درجتى T_2 و T_3 . (افترض أن $T_1 > T_2 > T_3$) . إثبت أن كفاءة هذه المجموعة يمكن كتابتها على الصورة $1-(T_3/T_1)$.

▪ 31 ـ افترض أن سعر الكهرباء \$0.075 /kWh وسعر الوقود البترولى \$1.25 /gal ، وأن الوقود البترولى يعطى عند احتراقه كمية قدرها 36,000 kcal من الحرارة لكل جالون . والآن لديك الاختيارات الآتية لتدفئة منزلك : (أ) تركيب حارق بترولى يولد الحرارة بكفاءة قدرها 75 فى المائة ، (ب) تركيب سخانات كهربائية تحول 100 فى المائة من الطاقة الكهربائية إلى حرارة ، (جـ) استخدام الكهرباء لتشغيل مضخة حرارية COP لها يساوى 4 . عين تكاليف الحصول على 100,000 kcal من الحرارة لتدفئة المنزل باستخدام كل من هذه الطرق .

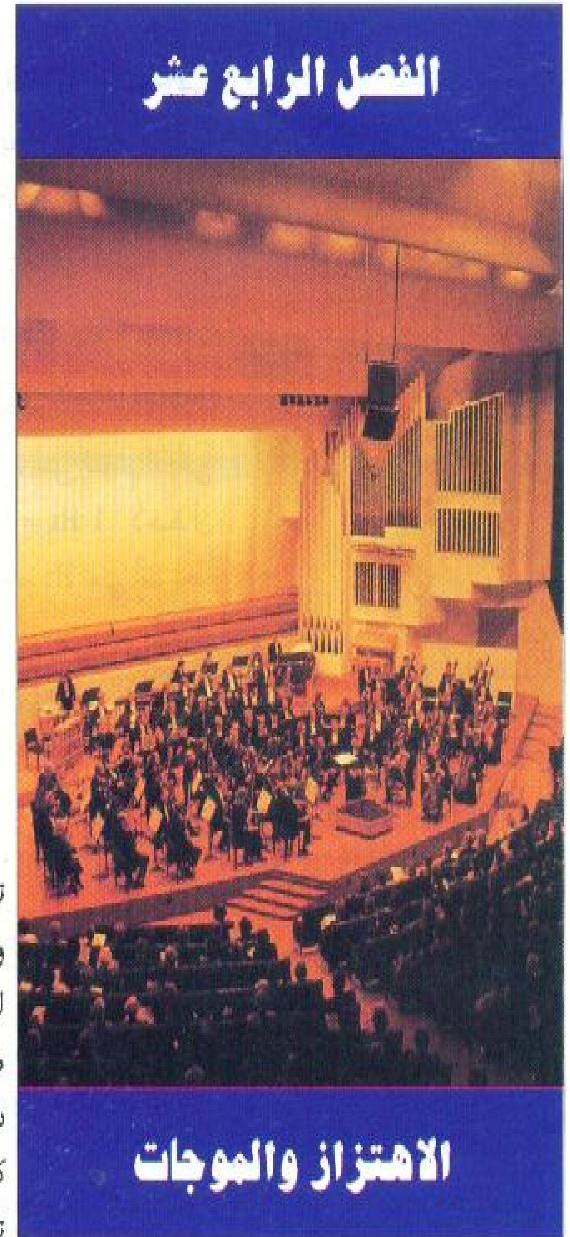
▪▪ 32 ـ يمكن تقريب الدورة الديناميكية الحرارية لمحركات الاحتراق الداخلى الحديثة إلى درجة معقولة باعتبارها مكونة من عمليتين أدياباتيتين وعمليتين أيسوكوريتين كما هو موضح بالشكل م 4–13 ، حيث ab و cd هما العمليتان الأدياباتيتان . وتعرف النسبة V_1/V_2 بنسبة انضغاط المحرك . وسنفترض أن خليط الهواء والوقود فى محرك من هذا النوع يسلك سلوك غاز مثالى النسبة بين حرارتيه النوعيتين $\gamma = 1.4$. استخدم تعريف الكفاءة بأنها النسبة W_{out}/Q_{in} فى تحليل هذه الدورة لإثبات أن كفاءتها يمكن كتابتها على الصورة :

$$\text{الكفاءة} = 1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1}$$

(ب) احسب كفاءة المحرك عندما $V_2 = 6\,V_1$ وعندما $V_2 = 20\,V_1$.



شكل م 4-13



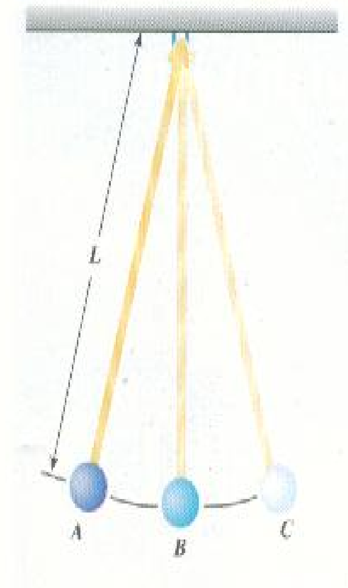
تناولنا فى الفصول السابقة مناقشة الميكانيكا وخواص المادة ، وسوف نقوم فى الفصلين التاليين بتطبيق الكثير من هذه المفاهيم لدراسة الاهتزاز والحركة الموجية . **والموجة** مصطلح ينطبق على مدى واسع من الظواهر الناتجة عن الأجسام المهتزة فى حركة دورية . فأوتار الجيتار أو الأحبال الصوتية تولد موجات الصوت ، كما أن الشحنات الكهربائية المهتزة على هوائى جهاز الراديو تولد الموجات اللاسلكية .

يختص هذا الفصل بوصف الحركة الموجية عمومًا مع إعطاء بعض الأمثلة البسيطة للحركات الدورية التى تولد الموجات فى زنبرك أو وتر مشدود . وسنقوم فى الفصل الخامس عشر بدراسة الموجات الصوتية التى يكون الوسط المهتز فيها هو جزيئات الهواء وليس وترًا أو زنبركًا . هذا وسوف نتعرض فى فصول تالية للموجات الكهرومغناطيسية ، كموجات الراديو أو الموجات الضوئية . وكما لا يخفى فإن موضوع الموجات موضوع عظيم الأهمية فى حياتنا .

14-1 الحركة الدورية

تتحرك جميع الأنظمة المهتزة نفس الحركة مرات ومرات ، فالبندول الموضح بالشكل 14-1 ، مثلاً ، يهتز (أو يتذبذب) ذهابًا وإيابًا مرة بعد مرة بعد مرة . ويقال فى مثل هذا الموقف إن الحركة دورية ؛ وسوف نعرف دورة الحركة (أو الزمن الدورى للحركة) كالتالى :

دورة الاهتزاز T (الحرف اليونانى تاو) هى الزمن اللازم لعمل اهتزازة كاملة .



شكل 1-14:
بندول يتحرك حركة دورية . يصنع البندول نصف دورة اهتزاز واحدة عندما تتحرك الكرة من أقصى موضع على الجانب الأيسر إلى أقصى موضع على الجانب الأيمن .

والدورة فى حالة البندول الموضح بالشكل 1-14 هى الزمن الذى يستغرقه البندول فى تأرجحه من A إلى C وعودته إلى A . لاحظ أن الدورة هى الزمن **الكلى** الذى تبتعد كرة البندول خلاله عن A أثناء اهتزازة كاملة . وتسمى الحركة التى يصنعها الجسم المهتز خلال دورة واحدة **بدورة الاهتزاز** .

كثيرًا ما نتحدث عن تردد الاهتزاز ، وهو يعرف كالتالى :

تردد الاهتزاز f هو عدد دورات الاهتزاز التى يكملها النظام المهتز فى وحدة الزمن .

ويعبر عن الترددات عادة بالدورات لكل ثانية (s^{-1}) فمثلاً ، قد يصنع وتر الجيتار 330 دورة اهتزاز فى 1 s ، وبذلك يكون تردده $330\ s^{-1}$. ووحدة التردد فى النظام SI هى الهرتز (Hz) ، وهى مجرد اسم آخر للدورات فى الثانية : $1\ Hz = 1\ s^{-1}$. لاحظ أن « الدورات » مصطلح ليس له أبعاد فيزيائية ، ولكن تذكر أن الوحدة Hz تعنى أنك تعد الدورات لكل ثانية .

هناك علاقة هامة بين التردد f والدورة τ . فحيث أن التردد هو عدد الاهتزازات لوحدة الزمن ، وحيث أن الاهتزازة الكاملة تستغرق زمنا قدره τ ، إذن :

$$f = \frac{\text{عدد الاهتزازت}}{\text{الزمن اللازم لها}} = \frac{\text{1 اهتزاز}}{\text{دورة}}$$

وعليه فإن العلاقة العامة هنا هى :

$$f = \frac{1}{\tau} \qquad (14-1)$$

هذه العلاقة تنطبق على جميع الحركات الدورية . فإذا كانت دورة حركة معينة هى 0.020 s ، مثلاً ، فإن ترددها سيكون 50 Hz .

وهناك أيضًا خاصية أخرى للحركة الدورية ، وهذه هى سعة الحركة .

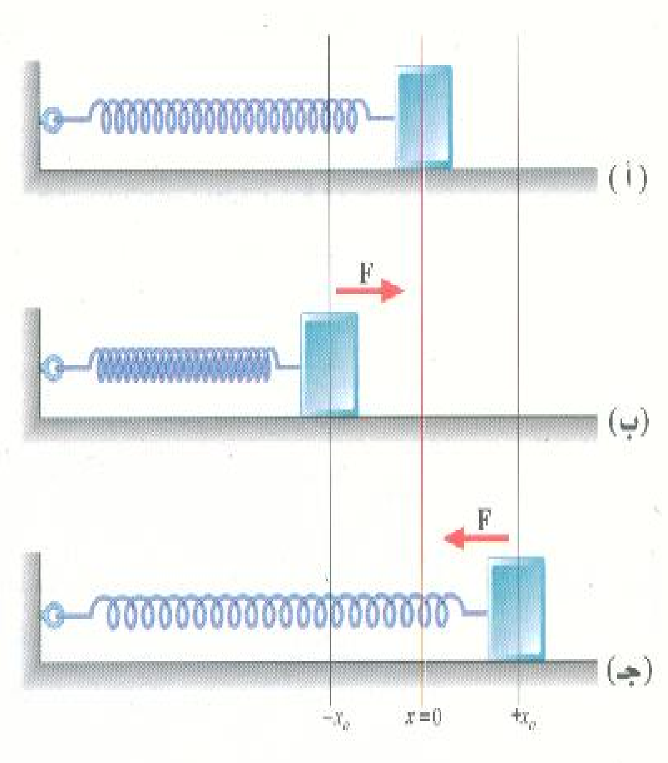
السعة هى أقصى إزاحة عن موضع اتزان الجسم عندما لا يكون الجسم مهتزًا .

فالسعة فى حالة البندول الموضح بالشكل 1-14 هى المسافة AB أو BC . لاحظ أن السعة هى نصف المسافة الكلية التى يتأرجح النظام خلالها فقط .

تعتبر طريقة التحول المتبادل لطاقتى حركة ووضع النظام المهتز سمة هامة أخرى للحركة الدورية . فمثلاً ، عندما تصل كرة البندول المبين بالشكل 1-14 إلى النقطة A أو C فإنها تسكن لحظيًا ، وبذلك لن يكون لها طاقة حركة ، بل سيكون لها طاقة جهد تثاقلى فقط عند هاتين النقطتين . ومع ذلك ، فعندما تتأرجح الكرة تجاه النقطة B فإنها تفقد طاقة الوضع ، وتكتسب كمية مساوية من طاقة الحركة . وعليه فإن طاقة الكرة تظل ثابتة أثناء تأرجحها ذهابًا وإيابًا ، ولكنها تتغير باستمرار من طاقة حركة إلى طاقة وضع ، وبالعكس أثناء التأرجح .

ويمثل الشكل 2-14 نظامًا مهتزًا نموذجيًا آخر . ويتكون هذا النظام من كتلة مثبتة

فى طرف زنبرك ، وسوف نفرض أن الكتلة يمكنها أن تنزلق على السطح الأفقى ذهابًا وإيابًا بدون احتكاك . ويمثل الجـزء (أ) نظام الكتلة والزنبرك فى حالة الاتزان ، حيث تكون القوة الأفقية المؤثرة على الكتلة صفرًا وهى فى هذا الموضع . (يتعادل شد الجاذبية إلى أسفل مع دفع المنضدة إلى أعلى ، وبذلك يكون صافى القوة الرأسية المؤثر على الكتلة صفرًا دائمًا) .



شكل 2-14:

(أ) الموضع $x = 0$ يمثل موضع اتزان الكتلة قبل بدأ حركة النظام ، وعند وجود الكتلة فى هذا الموضع لا يؤثر عليها الزنبرك بأى قوى .

(ب) للزنبرك المضغوط طاقة جهد مختزنة فيه ، ولذلك فهو يؤثر بقوة الاستعادة على الكتلة الساكنة لحظيًا .

(جـ) الزنبرك الممتد له أيضًا نفس القدر من طاقة الجهد المختزنة كما فى (ب) . ولذلك فهو يؤثر بنفس قوة الاستعادة على الكتلة الساكنة لحظيًا .

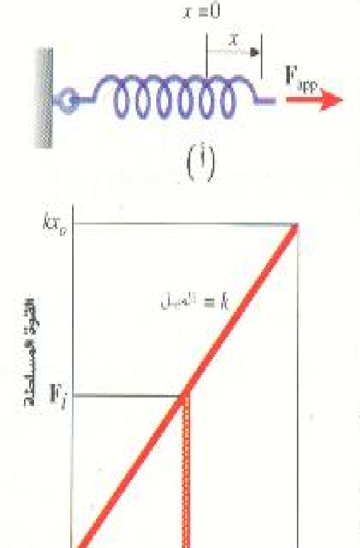
لنفرض أننا ضغطنا الزنبرك بتحريك الكتلة إلى الموضع $-x_0$ المبين بالشكل 2-14 ب . وهذا يعنى أننا نبذل شغلاً على الزنبرك أثناء هذه العملية ، وأننا بذلك نختزن فيه كمية معينة من طاقة الجهد . ونتيجة لذلك فإن الزنبرك سوف يؤثر على الكتلة بقوة معينة تميل إلى دفع الكتلة مرة أخرى إلى الموضع $x = 0$. فإذا أعتقت الكتلة الآن بحيث يمكنها الحركة بحرية تحت تأثير القوة المسلطة بواسطة الزنبرك ، فإن الزنبرك سوف يسبب تسارع الكرة إلى اليمين حتى تصل إلى الموضع $x = 0$. ولكن ما أن تصل الكرة إلى الموضع $x = 0$ فإنها تكون قد اكتسبت سرعة عالية ، ويكون الزنبرك قد فقد كل طاقة الجهد المختزنة فيه أثناء انضغاطه . من الواضح إذن أن طاقة الجهد المختزنة فى الزنبرك تظهر الآن على هيئة طاقة حركة للكتلة المتحركة .

ومع ذلك فلن تتوقف الكتلة عند $x = 0$ لأن لها طاقة حركة يجب أن تفقدها أولاً ببذل الشغل قبل أن تتوقف . وهكذا فإنها تستمر فى الحركة على الجانب الأيمن من $x = 0$ ، فتسبب بذلك امتداد الزنبرك واختزان الطاقة فيه . وبوصول الكتلة إلى الموضع $+x_0$ المبين بالشكل 2-14 جـ تكون قد فقدت كل طاقة حركتها ببذل الشغل ضد الزنبرك ، وبهذا الشكل تتحول طاقة حركة الكتلة إلى طاقة جهد فى الزنبرك الممتد . وبناء على ذلك تصبح سرعة الكتلة صفرًا لحظيًا عند $x = x_0$.

ونظرا لأن الزنبرك قد أصبح ممتدًا فإنه يبدأ فى تعجيل الكتلة إلى اليسار . وعند وصول الكتلة إلى النقطة $x = 0$ تتحول الطاقة كلها إلى طاقة حركة ، فتستمر فى الحركة يسارًا إلى أن ينضغط الزنبرك تدريجيًا حتى تصل الكرة مرة أخرى لى $x = -x_0$ ؛ وفى هذا الوضع تكون طاقة الحركة قد تحولت إلى طاقة جهد مختزنة فى الزنبرك المنضغط . وهكذا ، فإن الحركة سوف تكرر نفسها إلى الأبد مع اهتزاز الكرة ذهابًا وإيابًا بين $x = +x_0$ و $x = -x_0$ طالما لا توجد أى فواقد احتكاكية للطاقة . لاحظ أنه عندما تتذبذب الكرة بالطريقة السابق وصفها فإن الطاقة تتذبذب أيضًا ذهابًا وإيابًا بين طاقة الحركة وطاقة الوضع ، ولكن الطاقة الكلية تظل ثابتة ؛ فالطاقة محفوظة .

ويحدث موقف مشابه لذلك عند تعليق كتلة فى طرف زنبرك رأسى معلق من طرفه الآخر . فى هذه الحالة سوف يستطيل الزنبرك تحت تأثير وزن الكتلة المعلقة ويصل النظام إلى حالة الاتزان عندما تتعادل القوة المتولدة فى الزنبرك إلى أعلى مع الوزن إلى أسفل . وإذا أزيحت الكتلة مسافة صغيرة إلى أسفل ثم تحركت حرة فإنها سوف تهتز ذهابًا وإيابًا حول موضع الاتزان فى حركة تذبذبية رأسية . ومن الجدير بالذكر أن هذه الحركة التذبذبية الرأسية للكتلة المعلقة فى الزنبرك مماثلة تمامًا للحركة الأفقية السابق مناقشتها ؛ ولكننا لن نقوم بإثبات ذلك هنا .

يمثل البندول ونظام الكتلة والزنبرك مثالان فقط من أمثلة الأنظمة المهتزة ، وهذه الأنظمة جميعها تتميز بالتحول المتبادل لطاقة النظام المهتز بين طاقة الحركة وطاقة الوضع . وحيث أن كثيرًا من الأنظمة المهتزة الهامة تتضمن زنبركات من نوع أو آخر ، لنخصص الآن بعض الوقت لإيجاد الطاقة المختزنة فى زنبرك .



شكل 3-14:
لكى يستطيل الزنبرك بمقدار معين يجب أن تسلط عليه قوة خارجية مساوية ومضادة لقوة الاستعادة المؤثرة بواسطة الزنبرك . ونظرًا لأن قوة الاستعادة تتناسب مع مقدار الاستطالة x ، فإن $\mathbf{F}_{app} \sim x$ ، وهذا مبين بالجزء (ب) ، والشغل المبذول بواسطة $\mathbf{F}_{app}$ يساوى المساحة الواقعة تحت منحنى $\mathbf{F}_{app}$ مقابل x .

14-2 قانون هوك وطاقة الجهد المرن

رأينا فى الفصل التاسع أن كثيرًا من الأنظمة المرنة (الشبيهة بالزنبركات) تتبع قانون هوك الذى ينص على أن القوة المشوهة تتناسب مع التشوه الذى تسببه . وفى حالة زنبرك يستطيل تحت تأثير قوة مسلطة F_{app} كما بالشكل 3-14 أ فإن الإزاحة $\mathbf{x}$ التى يستطيل بها الزنبرك ترتبط بالقوة F_{app} تبعًا للعلاقة :

$$\mathbf{F}_{app} = k\mathbf{x} \tag{14-2}$$

حيث k مقدار ثابت يسمى **ثابت الزنبرك** ، ووحداته فى النظام SI هى النيوتن لكل متر . وثابت الزنبرك مقياس « لكزازة » الزنبرك ، فكلما زادت قيمة ثابت الزنبرك ، كلما زادت القوة اللازمة لإطالة الزنبرك بمقدار محدد .

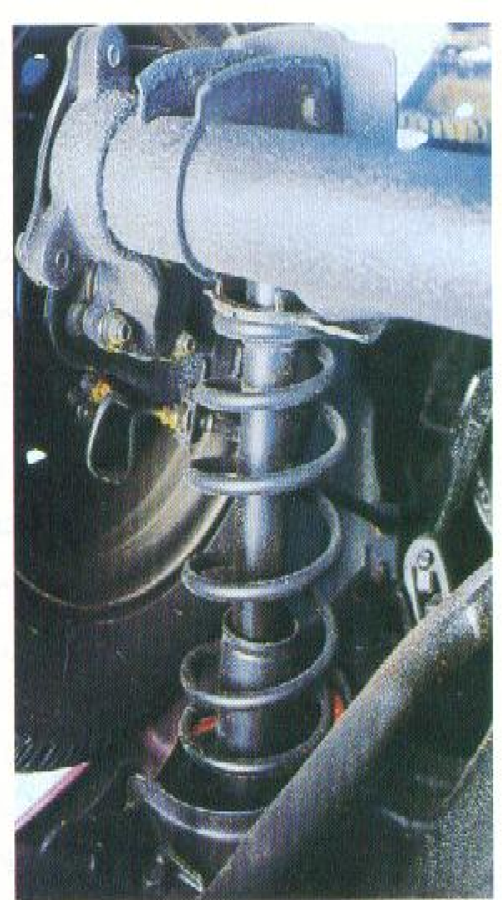
ويوضح الشكل 3-14 ب كيف تتغير القوة مع تشوه الزنبرك الموضح بالشكل 3-14 أ . هذا المنحنى عبارة عن خط مستقيم ميله يساوى k طبقًا للمعادلة (2-14) (قانون هوك) . لنحاول الآن حساب الطاقة المختزنة فى زنبرك ممتد أو منضغط يتبع قانون هوك .

يمكننا إثبات أن الشغل المبذول لإطالة الزنبرك من $x = 0$ إلى $x = x_0$ يساوى المساحة

تحت الخط المستقيم المبين بالشكل 3-14 ب . ولتحقيق ذلك يمكننا ملاحظة أن مساحة المستطيل المظلل بالشكل تساوى $F_i \Delta x_i$ ، حيث F_i هى قوة المطيلة أثناء الزيادة الصغيرة فى التشوه Δx_i . وحيث أن $W = F_s \Delta s$ ، إذن هذه المساحة تساوى أيضًا الشغل المبذول بواسطة قوة المطيلة أثناء هذه الزيادة الصغيرة فى الإزاحة . فإذا تخيلنا أن المنطقة الموجودة تحت الخط المستقيم من $x = 0$ إلى $x = x_0$ مملوءة بعدد كبير جدًا من مثل هذه المستطيلات ، فإن مجموع مساحات هذه المستطيلات يعطينا الشغل المبذول أثناء إطالة الزنبرك من $x = 0$ إلى $x = x_0$. إذن :

الشغل المبذول فى إطالة أو ضغط عنصر مرن يساوى المساحة المحصورة تحت الخط البيانى الذى يمثل F مقابل x .

وهذا شبيه بحساباتنا السابقة (القسم 3-12) عند استخدام الرسم البيانى PV لتعيين الشغل المبذول بواسطة غاز عندما يتغير حجمه ، وعليك إثبات أن ذلك صحيح أيضًا فى حالة انضغاط الزنبرك .



تتولد فى « اليايات الملتفة » للسيارة قوى تتناسب مع مقدار استطالتها أو انضغاطها . وتقوم ممتصات الصدمات الموجودة بمنتصفها بتخميد الاهتزازات الناتجة عند مرور السيارة على مطبات الطريق .

وحيث أن مساحة المثلث تساوى نصف حاصل ضرب طول قاعدته فى ارتفاعه ؛ إذن يمكننا أن نرى من الشكل 3-14 أن المساحة الواقعة تحت الخط البيانى تساوى $(\frac{1}{2}x_0)(kx_0)$. ولكن هذه المساحة تساوى الشغل المبذول فى إطالة الزنبرك ، ولذلك فهى تساوى طاقة الجهد المختزنة فى الزنبرك . بناء على ذلك يستنتج أن طاقة الجهد المختزنة فى زنبرك ثابتة k عند استطالته أو انضغاطه مسافة قدرها x تساوى :

$$\text{طاقة الجهد المرن} = EPE = \frac{1}{2}kx^2 \qquad (14-3)$$

والآن وقد تمكنا من إيجاد الطاقة المرنة المختزنة فى زنبرك (أو أى نظام يتبع قانون هوك) ، يمكننا استخدام قانون بقاء الطاقة لكى نعلم الكثير عن اهتزاز النظام الموضح بالشكل 2-14 . لقد فرضنا فى تلك الحالة أن فواقد الاحتكاك مهملة ، وهذا يعنى طبقا لقانون بقاء الطاقة أن مجموع طاقة الجهد المختزنة فى الزنبرك وطاقة حركة الكتلة يجب أن يظل ثابتًا . وللتعبير عن هذا المعنى فى صورة معادلة رياضية لنعد مرة أخرى إلى النظام المبين بالشكل 2-14 لحظة إعتاق الكتلة من الموضع $x = x_0$. والآن ، حيث أن الطاقة الكلية الابتدائية للنظام فى تلك الحظة تساوى $\frac{1}{2}kx_0^2$ ، فإن طاقته الكلية فى أى لحظة زمنية تالية تكون :

$$EPE + KE = \frac{1}{2}kx_0^2$$

وبالتعويض نجد أن :

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2 \qquad (14-4)$$

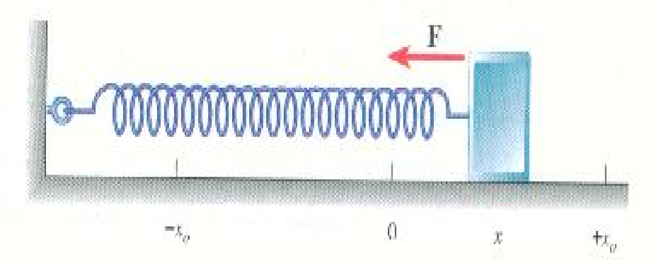
حيث m و v تعود على الكتلة المثبتة فى الزنبرك فقط ، لأننا نفترض أن كتلة الزنبرك نفسه مهملة . لاحظ أن x_0 تمثل هنا سعة الحركة .

والمعادلة 4-14 ، رغم بساطتها ، أداة فعالة جدًا فى مناقشة الحركة الاهتزازية ، ويمكن استخدامها لإيجاد سرعة الكتلة عند أى نقطة x فى مسار الحركة :

$$v = \pm\sqrt{\frac{k}{m}(x_0^2 - x^2)}$$

لا تحفظ هذه المعادلة لأنها هى نفس المعادلة 4-14 بعد إعادة ترتيب حدودها . لاحظ أن $v = 0$ عند $x = x_0$ ؛ أى عندما تكون الكتلة فى نهاية الاهتزازة ، وأن السرعة تصل إلى أكبر قيمة لها ، $x_0\sqrt{k/m}$ ، عند $x = 0$. ومع أننا نعلم هذه الحقائق من مناقشتنا الوصفية للتحول المتبادل للطاقة بين طاقتى الحركة والوضع ، فإننا نستطيع الآن إيجاد سرعة الكتلة المهتزة عند أى موضع x .

يتبقى علينا الآن إيجاد عجلة الكتلة المهتزة . عندما يهتز النظام اهتزازًا حرًا يكون الموقف كما هو مبين بالشكل 4-14 . وكما نرى من الشكل فإن القوة الوحيدة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة هى شد الزنبرك لها **F** ، وهذه القوة تسمى قوة الاستعادة لأنها تؤثر دائما فى اتجاه يعمل على جذب أو دفع النظام إلى موضع اتزانه . ومع أن مقدار **F**



شكل 4-14:
القوة التى يؤثر بها الزنبرك على الكتلة هى قوة استعادة تعطى بالعلاقة $F = -kx$.

يساوى kx ، أى نفس القوة اللازمة لإطالة الزنبرك بمقدار x ، إلا أن اتجاهها مضاد لاتجاه الاستطالة . وبذلك تكون قيمتها $\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$ ، حيث تشير الإشارة السالبة إلى أن هذه قوة استعادة ، أى قوة تؤثر فى اتجاه مضاد للإزاحة $\mathbf{x}$. وحيث أن $\mathbf{F}$ هى القوة غير المتزنة المؤثرة على الكتلة ، يمكننا أن نجد من العلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$. أن عجلة الكتلة تعطى بالمعادلة :

$$\mathbf{a} = -\frac{k}{m}\mathbf{x} \qquad (14\text{-}5)$$

لاحظ أن مقدار العجلة يصل إلى قيمته العظمى عند $x = \pm x_0$ لأن قوة الاستعادة تكون أكبر ما يمكن فى هذين الموضعين ؛ أما عند $x = 0$ فإن قوة الاستعادة تكون صفرًا ، وتكون العجلة بالتالى صفرًا . وهكذا نرى أنه يمكننا استعمال المعادلتين 4-14 و 5-14 لإيجاد سرعة وعجلة الكتلة عند أى إزاحة x .

مثال 1-14 :

علقت كرة قدرها 500 g فى زنبرك رأسى معين فسببت استطالته بمقدار 20 cm . لنفرض أننا استبدلنا هذه الكتلة بأخرى مقدارها 2.00 kg لتكوين نظام مهتز أفقى كالمبين بالشكل 4-14 . أزيحت هذه الكتلة الآن مسافة قدرها 40.0 cm عن موضع اتزانها ثم تركت حرة . أوجد (أ) السرعة القصوى للكتلة ، (ب) عجلتها القصوى ، (جـ) سرعة الكتلة وعجلتها عند $x = 10.0$ cm

أ

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الشرط اللازم تحققه عند السرعة القصوى ؟

الإجابة : تكون السرعة فى قيمتها القصوى عندما تكون الطاقة الكلية للنظام طاقة حركة ، وهذا يحدث عندما لا يكون الزنبرك ممتدًا أو منضغطًا ، أى عند $x = 0$.

سؤال : ما هو القانون الفيزيائى الذى يربط السرعة بالموضع ؟

الإجابة : قانون بقاء الطاقة :

$$\frac{1}{2}kx^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}kx_0^2$$

إذن : عند $x = 0$:

$$v = v_{\max} = \sqrt{\frac{k}{m}}x_0$$

سؤال : قيمة k مجهولة . ما هى الكميات اللازم معرفتها لكى يمكن حساب k ؟

الإجابة : ثابت الزنبرك k يساوى النسبة بين القوة المسلطة والاستطالة الناتجة فى الزنبرك ، وكل هذه البيانات المطلوبة معطاة فى نص المسألة .

سؤال : بالنسبة إلى الجزء (ب) ، ما هو الشرط اللازم تحققه عند العجلة القصوى ؟

الإجابة : تصل العجلة إلى أقصى قيمة لها عندما يكون صافي القوة في نهايته العظمى . وهذا يحدث عند نقطتي أقصى استطالة وأقصى انضغاط ، أي عند $x = +x_0$. هذا أيضًا هو الشرط الذي يتحقق عندما تكون طاقة الحركة صفرًا ، أو $v = 0$.

سؤال : بالنسبة للجزء (جـ) ، ما هو المبدأ الأساسي الذي يربط السرعة بأي موضع وسطي يقع بين $x = 0$ ، $x = \pm x_0$ ؟

الإجابة : هذا المبدأ ، مرة ثانية ، هو قانون بقاء الطاقة (المعادلة 4–14) . وحيث أن الطاقة الكلية عند أي موضع وسطي تساوي مجموع طاقتي الحركة والجهد ، إذن يمكننا كتابة :

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}k(x_0^2 - x^2)$$

سؤال : ما هي العلاقة بين العجلة والموضع ؟

الإجابة : تعتمد القوة التي يؤثر بها الزنبرك على الموضع طبقًا للعلاقة $\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$. وحيث أن هذه هي صافي القوة المؤثرة على m فإنها وحدها هي المسئولة عن العجلة طبقًا للعلاقة $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$.

الحل والمناقشة : يمكننا حل المعادلة (2–14) بالنسبة إلى k أولاً ، حيث $\mathbf{F}_{app}$ هي وزن الكتلة 500 g :

$$k = \frac{(0.500\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)}{0.200\ \text{m}} = 24.5\ \text{N/m}$$

(أ) وهكذا يمكن حساب مقدار السرعة القصوى مباشرة :

$$v_{max} = x_0\sqrt{\frac{k}{m}} = 0.400\ \text{m}\sqrt{\frac{24.5\ \text{N/m}}{2.00\ \text{kg}}} = 1.40\ \text{m/s}$$

عليك أن تتحقق من صحة الوحدات .

(ب) العجلة القصوى تساوي :

$$a_{max} = \frac{kx_0}{m} = \frac{(24.5\ \text{N/m})(0.400\ \text{m})}{2.00\ \text{kg}} = 4.90\ \text{m/s}^2$$

(جـ) والعجلة عند $\mathbf{x} = +10.0$ cm هي :

$$\mathbf{a} = -\frac{k\mathbf{x}}{m} = -\frac{(24.5\ \text{N/m})(0.100\ \text{m})}{2.00\ \text{kg}} = -1.22\ \text{m/s}^2$$

لاحظ أن اتجاه $\mathbf{a}$ مضاد لاتجاه الإزاحة $\mathbf{x}$. تذكر أيضًا أن k خاصية مميزة للزنبرك ، وأن قيمته ثابتة للزنبرك الواحد ، ويمكن إيجاد k بقياس النسبة F/x طالما كان الزنبرك يتبع قانون هوك .

وأخيرًا ، نحسب السرعة عند $x = 10.0$ cm كما يأتي :

$$\mathbf{v} = \pm\sqrt{\frac{k(x_0^2 - x^2)}{m}}$$

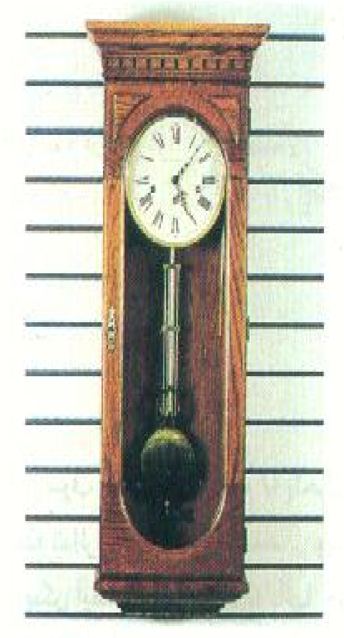
$$= \pm\sqrt{\frac{(24.5\ \text{N/m})[(0.400\ \text{m})^2 - (0.100\ \text{m})^2]}{2.00\ \text{kg}}}$$

$$= \pm\ 1.36\ \text{m/s}$$

ويلاحظ أن الإشارتين ضروريتان هنا لأن الكتلة قد تكون متحركة تجاه النقطة x_0 أو مبتعدة عنها عند $x = 10.0$ cm .

تمرين : أوجد **v** و **a** عند $x = -5.00$ cm . **الإجابة** : ± 1.39 m/s ، $0.613\ \text{m/s}^2$.

14-3 الحركة التوافقية البسيطة



يتحرك بندول ساعة الحائط حركة توافقية بسيطة . وحيث أن دورة البندول ثابتة فإن الساعة يمكنها قياس الوقت قياسًا صحيحًا .

هناك أنواع كثيرة من الحركة الدورية ، وما حركة الكتلة المعلقة فى زنبرك إلا أحد أنواع هذه الحركة . ومع أن وصف حركة الكتلة المعلقة فى زنبرك بسيط بشكل خاص ، إلا أن هناك أمثلة أخرى كثيرة ، كالبندولات مثلاً ، ينطبق عليها نفس هذا الوصف للحركة الدورية . والسمة الأساسية لهذه الأنظمة الدورية البسيطة هى أنه إذا أزيح النظام عن موضع الاتزان فإن **قوة الاستعادة الناشئة تتناسب خطيًا** مع مقدار الإزاحة .

وقد رأينا أن قانون هوك (المعادلة 2-14) الذى يحكم الحركة فى حالة نظام الكتلة والزنبرك يكتب على الصورة :

$$\mathbf{F} = -k\mathbf{x}$$

حيث k ثابت الزنبرك .

وبتعميم هذا التعبير نحصل على الصورة الأساسية لقانون القوة :

(14-6) قوة الاستعادة = - (ثابت) (الإزاحة عن موضع الاتزان)

وعندما تكون قوة الاستعادة هى القوة المؤثرة الوحيدة سنجد أن عجلة الكتلة المهتزة تأخذ الصورة :

(14-7)
$$\mathbf{a} = \frac{-\ (\text{ثابت})\ (\text{الإزاحة})}{\text{الكتلة}}$$

وتسمى حركة أى نظام تحت تأثير القوة المعطاة بالمعادلة (6-14) بالحركة التوافقية البسيطة (SHM) .

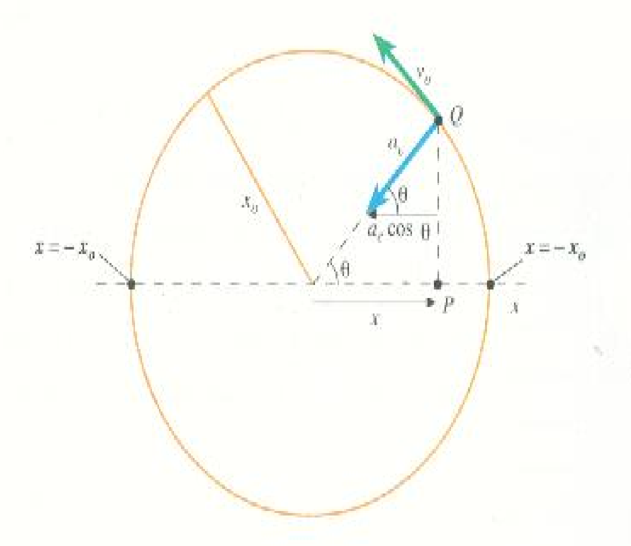
الحركة التوافقية البسيطة هى الحركة الناشئة نتيجة لاستجابة النظام لقوة استعادة تتناسب خطيًا مع مقدار إزاحة النظام عن موضع الاتزان .

وبتحليل قوة الاستعادة فى أى موقف معين يمكننا إيجاد ثابت التناسب فى المعادلتين (6-14) و (7-14) ، والذى يسمى **ثابت القوة** للنظام المعنى . وهكذا فإن ثابت القوة يلعب فى هذه الحركة نفس الدور الذى يلعبه ثابت الزنبرك k فى حركة النظام المكون من الكتلة والزنبرك تمامًا . وإذا ما تمكنا من إثبات أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع إزاحة النظام عن موضع الاتزان ، وفى عكس اتجاهه لن يكون من الضرورى اشتقاق معادلات

الحركة السابقة مرة أخرى ، بل يمكننا تطبيقها مباشرة . وقبل الانتقال إلى أمثلة أخرى للحركة التوافقية البسيط لنناقش اعتماد هذه الحركة على الزمن أولاً ونشتق تعبيرًا لترددها .

14-4 تردد الحركة التوافقية البسيطة

يعتبر إيجاد تعبير لتردد الحركة التوافقية البسيطة باستعمال حساب التفاضل والتكامل مسألة مباشر تمامًا ، ولكننا سنستخدم الطريقة البيانية هنا لأن الإلمام بحساب التفاضل والتكامل ليس من متطلبات هذا المقرر .



شكل 14-5: عندما يتحرك الجسيم Q على محيط دائرة نصف قطرها x_0 بسرعة ثابتة المقدار v_0 ، تتحرك النقطة P حركة توافقية بسيطة من $-x_0 \le x \le x_0$ ، ونظرا لأن نصف قطر الدائرة x_0 ، إذن $x = x_0 \cos\theta$.

سوف نبدأ بتخيل جسيم Q يتحرك بسرعة ثابتة v_0 المقدار في دائرة نصف قطرها x_0 . هذه الدائرة تسمى **دائرة الإسناد** ، ويمثل الشكل 14-5 رسمًا تخطيطيًا لهذه الحركة . ويمكن أيضًا وصف حركة Q بأنها حركة ذات سرعة زاوية $\omega = \Delta\theta / \Delta t$ ثابتة تعطى بالعلاقة $\omega = v_0/x_0$ (المعادلة 7-7) . تذكر من القسم 7-2 أن ω تقاس بالزاوية نصف القطرية لكل ثانية . ولكن الدورة T التى يصنع خلالها الجسيم Q دورة كاملة هى الزمن اللازم للدوران حول الدائرة مرة واحدة ، أو :

$$T = \frac{2\pi x_0}{v_0} = 2\pi\left(\frac{x_0}{v_0}\right)$$

إذن ، تردد الحركة f ، أى عدد الدورات لكل ثانية ، هو مجرد مقلوب الدورة :

$$f = \frac{1}{T}$$

لاحظ فى الشكل 14-5 أن النقطة P تمثل موضع مسقط الجسيم Q على المحور x ، حيث $x = x_0 \cos\theta$ لأى قيمة للإحداثى x . ومعنى ذلك أنه **عندما يدور الجسيم Q على محيط الدائرة دورة كاملة فإن P تتحرك على استقامة المحور x من $+x_0$ إلى $-x$ ثم تعود إلى $+x_0$ بنفس الدورة وبنفس التردد كالجسيم Q تمامًا وسوف نثبت الآن أن P تتحرك SHM .**

طبقًا للمعادلة (7–9) ، تعطى العجلة الطاردة المركزية للحركة الدائرة للجسيم Q بالعلاقة :

$$a_c = \frac{v_0^2}{x_0} = \omega^2 x_0$$

لاحظ أن هذه العجلة a_c تعمل في اتجاه نصف القطر إلى داخل ، كما هو مبين بالشكل 5–14 وبناء على ذلك فإن العجلة المناظرة للنقطة P تساوى مركبة a_c في اتجاه المحور x :

$$\mathbf{a}(P) = -a_c \cos\theta$$

وتعنى الإشارة السالبة أن عجلة النقطة P ؛ أى $\mathbf{a}(P)$ ، تؤثر فى الاتجاه السالب للمحور x . إذن ، باستخدام التعبير الخاص بالعجلة الطاردة المركزية a_c والعلاقة $x/x_0 = \cos\theta$ نحصل على :

$$\mathbf{a}(P) = -\omega^2 x \qquad (14\text{–}8)$$

حيث ω ثابتة . هذا يثبت أن النقطة P تتحرك SHM ، وذلك لأن العلاقة $\mathbf{a} = -k\mathbf{x}$ تمثل الصورة العامة لعجلة الحركة التوافقية البسيطة .

الآن أصبح إيجاد تردد الحركة التوافقية البسيطة عمومًا مسألة فى غاية البساطة ، فباستعمال المعادلتين (7–14) و (8–14) نجد أن :

$$\mathbf{a} = -\omega^2\mathbf{x} = -\left(\frac{k}{m}\right)\mathbf{x}$$

حيث k ثابت القوة فى المعادلة (7–14) . وهكذا يمكن تعريف ω كالتالى :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (14\text{–}9)$$

إذن ، تردد الحركة التوافقية البسيطة للنقطة P هو :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (14\text{–}10)$$

كما أن دورة الحركة التوافقية البسيطة هو :

$$T = \frac{1}{f} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (14\text{–}11)$$

وحيث أن هذا الاشتقاق لا يختص بمثال محدد للحركة التوافقية البسيطة ، يمكننا إذن استنتاج أن المعادلتين (10–14) و (11–14) هما التعبيران العامان لتردد ودورة أى نظام يتحرك SHM . وعليه ، **إذا أمكننا إيجاد ثابت القوة k لنظام معين ، يمكننا إيجاد f و T لهذا النظام مباشرة .**

مثال توضيحى 1-14

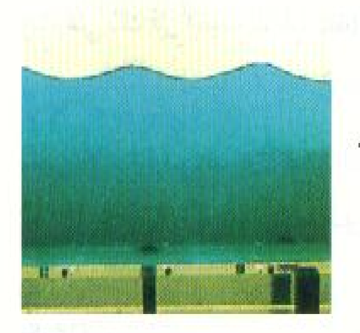
أوجد تردد اهتزاز النظام السابق مناقشته فى المثال 1–14 .

استدلال منطقى : فى ذلك المثال كان ثابت الزنبرك 24.5 N/m وكانت الكتلة المثبتة فى طرف الزنبرك 2.00 kg . إذن ، باستعمال المعادلة (14–10) نجد أن :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{24.5\ \mathrm{N/m}}{2.00\ \mathrm{kg}}} = 0.557\ \mathrm{s^{-1}} = 0.557\ \mathrm{Hz}$$



14-5 الحركة الجيبية

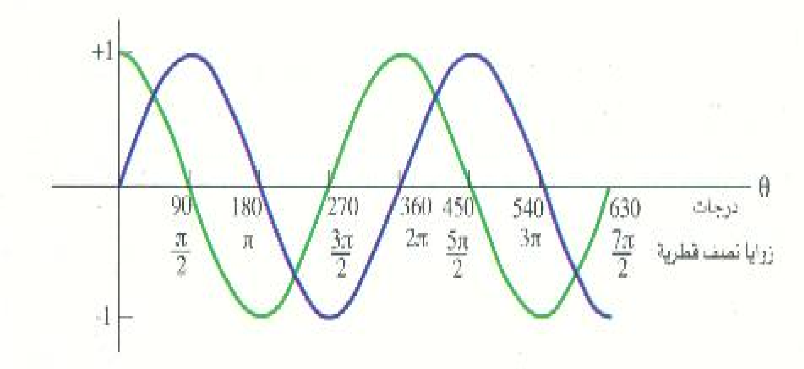


تبين هذه الصورة الفوتوغرافية للمقطع المستعرض لموجة على سطح الماء الشكل الجيبى لهذه الموجة .

من المكن كتابة معادلة رياضية بسيطة لأى جسم يهتز فى حركة توافقية بسيطة فالإحداثى x للنقطة P فى الشكل 14-5 يعطى بالعلاقة :

$$x = x_0 \cos\theta$$

أى أن x تتناسب طرديًا مع $\cos\theta$ ، لأن x_0 ثابتة . لننظر الآن إلى منحنى كل من الدالتين $\sin\theta$ و $\cos\theta$ كما هما موضحان بالشكل 14-6 . هذا الشكل يبين أن كلتى الدالتين تتغيران دوريًا من 1- إلى 1+ بدورة قدرها $360°$ ، أو 2π زاوية نصف قطرية . ويتغير $\cos\theta$ بين هذين الحدين تتغير x من $+x_0$ إلى $-x_0$ ، وهما يمثلان سعة حركتنا التوافقية البسيطة . وهنا تسمى الزاوية θ **طور** $\cos\theta$ و $\sin\theta$. لاحظ أن المنحنيين متماثلان من جميع



شكل 14-6:
منحنى الدالة $\sin\theta$ مقابل θ (الخط الأزرق) والدالة $\cos\theta$ مقابل θ الزمن (الخط الأخضر) .

الوجوه باستثناء أن الدالة $\sin\theta$ مختلفة عن $\cos\theta$ بمقدار ربع دورة ، ويقال عندئذ أن دالة جيب الزاوية **متفاوتة الطور** مع دالة **جيب تمام الزاوية** بمقدار ربع دورة ، أو $90°$.

فى وصف الحركة التوافقية البسيطة بالقسم السابق كانت الزاوية θ تتغير مع الزمن بمعدل ثابت قدره ω ، حيث $\theta = \omega t$ ، وهذا يمكننا من وصف موضع النقطة P فى أى لحظة زمنية بالعلاقة :

$$x = x_0 \cos(\omega t) = x_0 \cos(2\pi f t) = x_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \qquad (14\text{–}12)$$

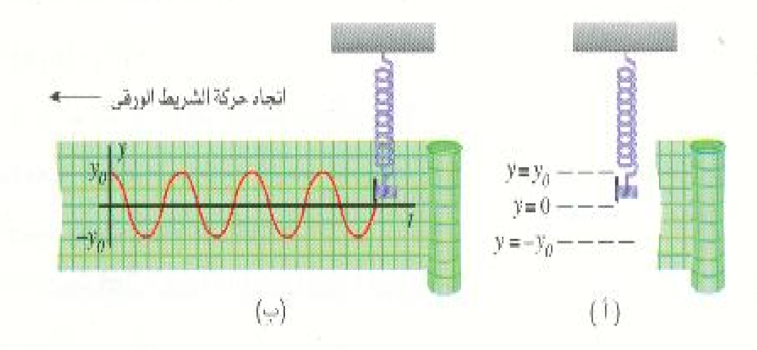
لاحظ أن هذه التعبيرات الثلاثة متكافئة ، **ومن الحيوى أن تتذكر أن الكمية بين القوسين فى هذه التعبيرات الثلاثة مقدرة بالزوايا نصف القطرية .**

تعرف الحركة التى يمكن وصفها كدالة فى الزمن على هيئة جيب تمام الزاوية (أو

جيب الزاوية) **بالحركة الجيبية** ، أى أن الحركة الجيبية أو الحركة التوافقية البسيطة شىء واحد . ولتخيل الطبيعة الجيبية للحركة التوافقية البسيطة يمكننا الاستعانة بالتجربة التوضيحية المبينة بالشكل 7–14 . والجهاز المستخدم هنا يتكون من جسم معلق فى زنبرك رأسى ، وهذا الجسم يحمل قلمًا يتلامس سنه مع شريط ورقى يتحرك إلى اليسار بسرعة ثابتة . فإذا رفع الجسم إلى أعلى مسافة قدرها y_0 ثم ترك حرًا ، فإنه سوف يتحرك حركة توافقية بسيطة سعتها y_0 ، وعندئذ سوف يرسم القلم على الورقة منحنى يمثل موضع الجسم أثناء اهتزازه إلى أعلى وإلى أسفل .

لنبدأ قياس الزمن ، $t = 0$ ، من لحظة تحرير الجسم ، وهذه النقطة هى الطرف الأيسر للمنحنى بالجزء (ب) من الشكل . أما موضع الجسم فى اللحظة المبينة بالشكل فيحدث بعد مرور زمن معين . ومن ثم يمكن اعتبار هذا المنحنى بمثابة رسم بيانى لإزاحة الجسم y كدالة فى الزمن . وطبقًا للمعادلة (12–14) فإن معادلة هذا المنحنى هى :

$$y = y_0 \cos(2\pi ft) = y_0 \cos(\omega t) = y_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$



شكل 7–14:
ترسم الكتلة المهتزة منحنى جيب تمام الزاوية كدالة فى الزمن .

وحيث أن* $a(t) = -(k/m)x(t)$ فى حالة الحركة التوافقية البسيطة ، فإن اعتماد a على الزمن يوصف أيضًا بنفس الدالة الجيبية ، ولكن بإشارة السالبة :

$$a_{\max} = \left(\frac{k}{m}\right)x_0 = 4\pi^2 f^2 x_0 \quad \text{حيث} \quad a = -a_{\max}\cos(2\pi ft) \qquad (14\text{–}13)$$

ونظرًا لأن الدالة $-\cos(2\pi ft)$ متأخرة عن $+\cos(2\pi ft)$ بمقدار نصف دورة ، يقال أن العجلة **متفاوتة الطور** مع x بمقدار نصف دورة أو $180°$.

لندرس أخيرًا كيفية تغير السرعة مع الزمن . لقد رأينا فى القسم 2–14 بناء على اعتبارات الطاقة أن مقدار سرعة الكتلة يكون فى نهايته العظمى عند $x = 0$ ويكون صفرًا عندما تكون x فى نهايتها العظمى (أى عندما $x = x_0$) . يمكننا أن نتوقع إذن أن قيمة v تتذبذب بين $v_{\max}$ و $-v_{\max}$ بطريقة مشابهة لتذبذب x و a . وهذا صحيح بالطبع ، باستثناء أن v متفاوتة الطور بمقدار ربع دورة ($90°$) مع x و a ، ومن ثم فإنها توصف بالدالة $\sin(2\pi ft)$:

---

* تذكر أن الرمزين $x(t)$ و $a(t)$ يعنيان أن x و a يعتمدان على قيمة الزمن t . ويقرأ الرمز $x(t)$ هكذا : « x كدالة فى t » .

$$v = -v_{max} \sin(2\pi ft) \qquad (14\text{-}14)$$

حيث وجدنا سابقًا أن $v_{max} = x_0\sqrt{k/m} = 2\pi f x_0$.

مثال 2-14 :

لنرجع مرة أخرى إلى المثال 1-14 . اكتب تعبيرى الموضع والسرعة كدالة فى الزمن . احسب موضع وسرعة وعجلة الكتلة عند اللحظة $t = 1.00$ s .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى المعطيات اللازم معرفتها لكتابة تعبيرى x و v ؟

الإجابة : التعبيرات العامة للحركة التوافقية البسيطة للكتلة m من $x = +x_0$ عند $t = 0$ هى :

$$x = x_0 \cos(2\pi ft)$$

$$v = -2\pi f x_0 \sin(2\pi ft)$$

$$a = -4\pi^2 f^2 x_0 \cos(\pi ft)$$

وبفحص هذه المعادلات الثلاث نجد أن كل ما نحتاج معرفته هو السعة x_0 والتردد f ، وهما معلومان من المثال 1-14 والمثال التوضيحى 1-14 .

سؤال : كيف يمكن إيجاد قيمة دالتى الجيب وجيب التمام عند $t = 1.00$ ؟

الإجابة : النقطة الهامة هى أن نتذكر أن الكمية $2\pi ft$ مقدرة بالزوايا نصف القطرية وليس بالدرجات .

الحل والمناقشة : نعلم من المثال التوضيحى 1-14 أن $f = 0.557$ Hz . وبوضع $t = 1.00$ s نحصل على :

$$2\pi ft = 2\pi(0.557\ s^{-1})(1.00\ s) = 3.50\ rad$$

وباستخدام الآلة الحاسبة نحصل على :

$$\sin(3.50\ rad) = -0.351 \qquad \cos(3.50\ rad) = -0.936$$

وحيث أن السعة $x_0 = 0.40$ m ، إذن بوضع $t = 1.00$ s نحصل على :

$$x = (0.40\ m)(-0.936) = -0.37\ m$$

$$v = -2\pi(0.557\ Hz)(0.40\ m)(-0.351) = +0.49\ m/s$$

$$a = -4\pi^2(0.557\ Hz)^2(0.40\ m)(-0.936) = +4.6\ m/s^2$$

وتبين الإشارات فى هذه الحالة أن x تقع يسار موضع الاتزان فى الشكل 4-14 ، وأن النقطة تتحرك إلى اليمين (عائدة من $-x_0$) وأن اتجاه عجلتها إلى اليمين .

مثال 3-14 :

تتحرك كتلة مقدارها 250 g حركة توافقية بسيطة تبعًا للعلاقة $x = (1.30\text{ m})\cos(2.09\,t)$.

(أ) ما هى سعة وتردد هذه الحركة ؟ (ب) ما قيمة ثابت القوة لهذا النظام ؟

(جـ) أوجد الزمن الذى تصل الكتلة عنده إلى الموضع $+\frac{1}{2}x_0$ لأول مرة بعد تحرير النظام .

استدلال منطقى :

سؤال : أين تظهر السعة والتردد فى العلاقات المعطاة ؟

الإجابة : من الصيغة العامة للحركة التوافقية البسيطة ، $x = x_0\cos(2\pi ft)$ ، يمكننا القول أن السعة x_0 هى ذلك العدد المضروب فى دالة جيب التمام . كذلك فإننا نرى أن العدد المضروب فى t داخل دالة جيب التمام يساوى $2\pi f$. وهكذا فإننا نستنتج من المعطيات أن $2\pi f = 2.09$.

سؤال : كيف يمكن تعيين ثابت القوة ؟

الإجابة : يتعين التردد f بثابت القوة k والكتلة m :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

أى أنه يمكن حساب k بمعلومية f .

سؤال : ما معنى العبارة « عندما تصل x إلى $\frac{1}{2}x_0$ لأول مرة » ؟

الإجابة : يجب أن نتذكر أن الكتلة سوف تمر بهذا الموضع مرات عديدة مع التغيرات الدورية فى قيمة $\cos(2\pi ft)$. أى أن المطلوب هو إيجاد أصغر قيمة للزمن t تحقق العلاقة $x = \frac{1}{2}x_0$.

سؤال : ما هى المعادلة التى تصف لنا متى يحدث ذلك ؟

الإجابة : تحل المعادلة (12–14) بالنسبة إلى أصغر زمن تتحقق عنده العلاقة $x(t) = \frac{1}{2}x_0$:

$$\frac{1}{2}x_0 = x_0\cos(2.09t) \quad \text{أو} \quad 0.500 = \cos(2.09t)$$

ولإيجاد t يلزم حساب معكوس جيب التمام :

$$\cos^{-1}(0.500) = 2.09t \qquad \text{(radians)}$$

الحل والمناقشة :

(أ) من معادلة الحركة نستنتج أن :

$$x_0 = 1.3\text{ m} \quad \text{أو} \quad 2\pi f = 2.09\text{ /s}$$

ومن العلاقة الأخيرة نجد أن $f = 0.333$ Hz ، ومنه $T = 1/f = 3.00$ s .

(ب) ومن العلاقة $k/m = (2\pi f)^2 = (2.09)^2$ نحصل على :

$$k = (0.250 \text{ kg})(4.37 \text{ Hz}^2) = 1.09 \text{ N/m}$$

(جـ) أصغر قيمة للزمن t تحقق العلاقة $\cos^{-1}(0.500) = 2.09t$ rad هي :

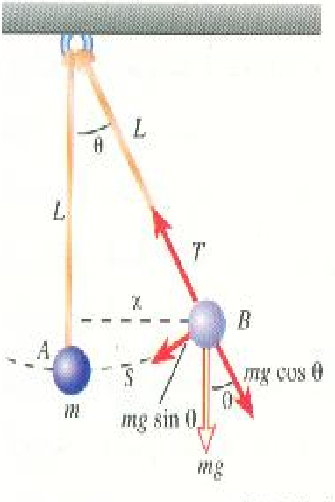
$$t = \frac{\cos^{-1}(0.500)}{2.09 \text{ Hz}} = \frac{1.05}{2.09 \text{ Hz}} = 0.500 \text{ s}$$

ويمكننا أن نرى من صيغة $x(t)$ أن $\cos(2\pi ft) = \cos 0 = 1$ عند $t = 0$ ، وهذا يبين أن الوضع الابتدائي للكتلة هو $+x_0$. ونحن نعلم أن الكتلة سوف تصل إلى الموضع $x = 0$ بعد ربع دورة ، أو $T/4 = 3.00 \text{ s}/4 = 0.750$ s ، حيث تمر بالموضع $x = \frac{1}{2}x_0$ لأول مرة وهي في طريقها إلى $x = 0$. وهذا يتفق مع الإجابة $t = 0.500$ s التي حصلنا عليها سابقًا .

6-14 البندول البسيط

نحن نعلم أن أي بندول بسيط كالمبين بالشكل 8-14 يتذبذب في حركة دورية . فإذا أمكن إثبات أن قوة الاستعادة تتناسب طرديًا مع الإزاحة عن موضع الاتزان فإننا نستنتج أن البندول يتحرك حركة توافقية بسيطة .

ومن المعلوم أيضًا أن البندول يكون في موضع الاتزان عندما يكون الخيط رأسيًا . وإذا أزيح البندول من موضع الاتزان بحيث يصنع الخيط زاوية θ مع الرأسي ، كما هو مبين



شكل 8-14:
البندول البسيط . قوة الاستعادة هي $mg \sin\theta \approx mg\theta$. لاحظ أن $\theta = s/L$ حيث s طول القوس بين النقطتين A و B .



أمثلة للبندولات : تهتز مراجيح الأطفال بتردد يعتمد على أطوالها .

بالشكل 8–14 ، سوف نجد أن هناك قوتين مؤثرتين على الكتلة m هما : الشد $\mathbf{T}$ وهو يؤثر على استقامة الخيط في اتجاه نقطة التعليق دائمًا ، والوزن $m\mathbf{g}$ ويؤثر رأسيًا إلى أسفل دائمًا . ومن الواضح أن صافي القوة نصف القطرية على استقامة الخيط ($T - \text{mg} \cos \theta$) يجبر الكتلة m على الحركة على قوس دائري نصف قطره يساوي طول البندول L . أما المركبة المماسية للوزن $m\mathbf{g}$ وتساوي $mg \sin \theta$ فتؤثر دائمًا على استقامة قوس الدائرة تجاه نقطة الاتزان . وعليه يمكننا كتابة :

$$F_{\text{restoring}} = -mg \sin \theta$$

حيث تبين الإشارة السالبة أن القوة فى عكس اتجاه زيادة θ . لاحظ أن هذه القوة لا تتناسب مع الإزاحة الزاوية θ . ولكن في حالة الزوايا الصغيرة يمكننا استخدام حقيقة أن $\sin \theta \approx \theta$ ، حيث θ مقدرة بالزوايا نصف القطرية . (هذا التقريب يكون مضبوطًا إلى ثلاثة أرقام معنوية إذا كانت $\theta \ll 10^\circ$ ، أى 0.174 rad) . ومن تعريف القياس نصف القطرى للزوايا يمكننا أيضًا كتابة $\theta = s/L = x/L$. ومن ثم سوف تأخذ قوة الاستعادة الصورة :

$$F = -mg\theta = -\left(\frac{mg}{L}\right)x \qquad (14\text{–}15)$$

وهى صورة للعلاقة بين القوة والإزاحة فى حالة SHM .

وبمقارنة هذه المعادلة بالصيغة العامة $F = -kx$ نجد مباشرة أن :

$$k = \frac{mg}{L}$$

ومنه يمكن الحصول مباشرة على تردد اهتزاز البندول :

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{L}} \qquad (14\text{–}16)$$

لاحظ أن تردد البندول البسيط لا يعتمد على كتلة البندول ، ولكنه يعتمد فقط على الطول L وعجلة الجاذبية g . وبالرغم من بساطة هذه النتيجة إلا أنها تمثل طريقة دقيقة لقياس g . ويمكن تحقيق ذلك بقياس متوسط الزمن الدورى لبندول معلوم الطول ثم استخدامه لحساب التردد f ثم التعويض فى المعادلة (16–14) لحساب g :

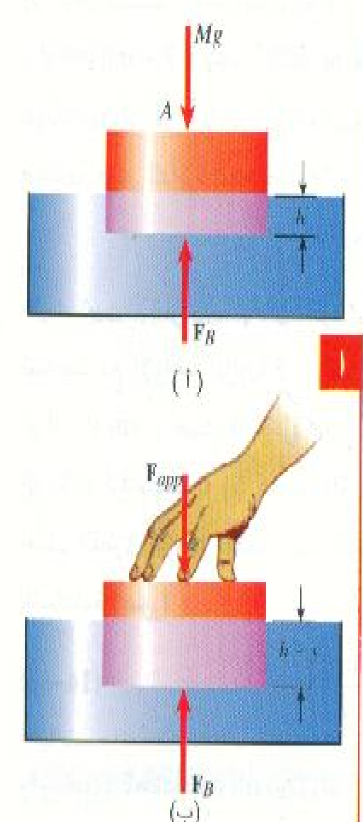
ومن الممكن كتابة معادلة حركة البندول كالتالى :

$$\theta = \theta_0 \cos(2\pi f t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{L}}\, t\right)$$

تذكر أن النتائج السابقة تكون صحيحة عندما تكون سعة تأرجحات البندول صغيرة ، أى عندما تكون $\sin \theta \approx \theta$.

مثال 4-14 :

اعتبر قالبًا من الخشب كتلته M ومساحة مقطعه المستعرض A يطفو على سطح الماء كما هو مبين بالشكل 9-14 أ ، وافترض أن سمك الجزء المغمور من القالب في حالة الاتزان هو h . إثبت مستعينا بدراستك السابقة لقوى الطفو (الفصل التاسع) أنه إذا دفع القالب إلى أسفل مسافة صغيرة y (شكل 9-14 ب) ثم ترك حرا فإنه سوف يتذبذب إلى أعلى وإلى أسفل في SHM . (افترض أن اللزوجة مهملة) . استنتج كذلك تعبيرًا لتردد الذبذبات .



شكل 9-14:
(أ) قالب خشبي يطفو على سطح الماء . عمق الجزء المغمور من القالب h ؛ $F_B = Mg$. (ب) دفع القالب إلى أسفل مسافة إضافية y تحت تأثير القوة F_{app} . هذه العملية تؤدي إلى زيادة قوة الطفو بمقدار F'_B يتناسب مع y .

استدلال منطقي :

سؤال : كيف نثبت أن الحركة هي SHM ؟

الإجابة : يجب إثبات أن صافي قوة الاستعادة المؤثر على القالب يتناسب طرديًا مع الإزاحة y .

سؤال : ما هي القوى المؤثرة على القالب ؟

الإجابة : في حالة الاتزان يتعادل وزن القالب إلى أسفل مع قوة الطفو المؤثرة على القالب إلى أعلى .

سؤال : بماذا تتعين قوة الطفو ؟

الإجابة : هذه القوة تساوي وزن الماء المزاح بواسطة القالب .

إذن :
$$Mg = \rho_{H_2O} Ahg$$

في حالة الاتزان .

سؤال : إذا دفع القالب إلى أسفل مسافة إضافية قدرها y ؛ فما قيمة قوة الدفع الإضافية الناتجة عن ذلك ؟

الإجابة : هذه القوة تؤثر إلى أعلى ، وهي تساوي وزن الماء الإضافي المزاح ، أي $\rho_{H_2O} Ayg$.

سؤال : ما قيمة صافي القوة المؤثر على القالب عند تركه حرًا بعد دفعه مسافة قدرها y إلى أسفل ؟

الإجابة : هذه القوة تساوي قوة الطفو الإضافية بإشارة سالبة .

$$F = -(\rho_{H_2O} Ag)y$$

وحيث أن الكمية بين القوسين مقدار ثابت ، إذن هذه هي الصيغة العامة لتعريف الحركة التوافقية البسيطة . ويجب أن تكون قادرًا على إثبات أنه إذا رفع القالب مسافة صغيرة y إلى أعلى فإنك ستحصل على نفس النتيجة .

سؤال : بماذا يتعين تردد الحركة ؟

الإجابة : يمكن إيجاد التردد بمعلومية ثابت القوة k والكتلة M :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{k}{M}}$$

سؤال : ما هو ثابت القوة فى هذه الحالة ؟

الإجابة : هو دائمًا ثابت التناسب بين القوة والإزاحة . إذن ، فى هذه الحالة :

$$k = \rho_{H_2O} Ag$$

الآن أصبح لدينا كل المعلومات اللازمة لكتابة صيغة التردد f . تذكر الصيغة الرياضية لكتلة القالب :

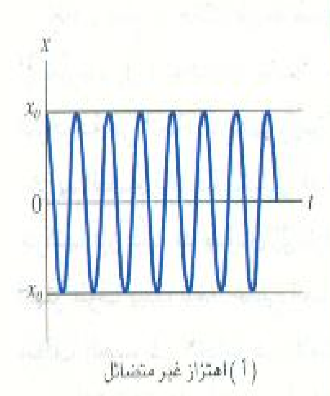
$$M = \rho_{H_2O} Ah$$

إذن ، بالتعويض عن M و k فى معادلة f نحصل على :

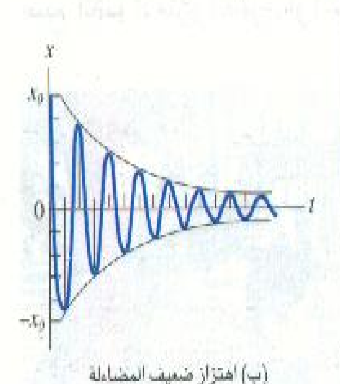
$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho_{H_2O} Ag}{\rho_{H_2O} Ah}} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{h}}$$

هذه النتيجة الهامة تبين أن التردد هنا على نفس صورة التردد فى حالة البندول البسيط ، حيث يحل عمق الجزء المغمور محل طول البندول .

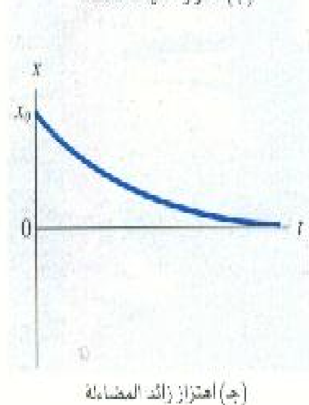
14-7 الاهتزاز القسرية والمتضائلة (المخمدة)



(أ) اهتزاز غير متضائل



(ب) اهتزاز ضعيف المضاءلة



(جـ) اهتزاز زائد المضاءلة

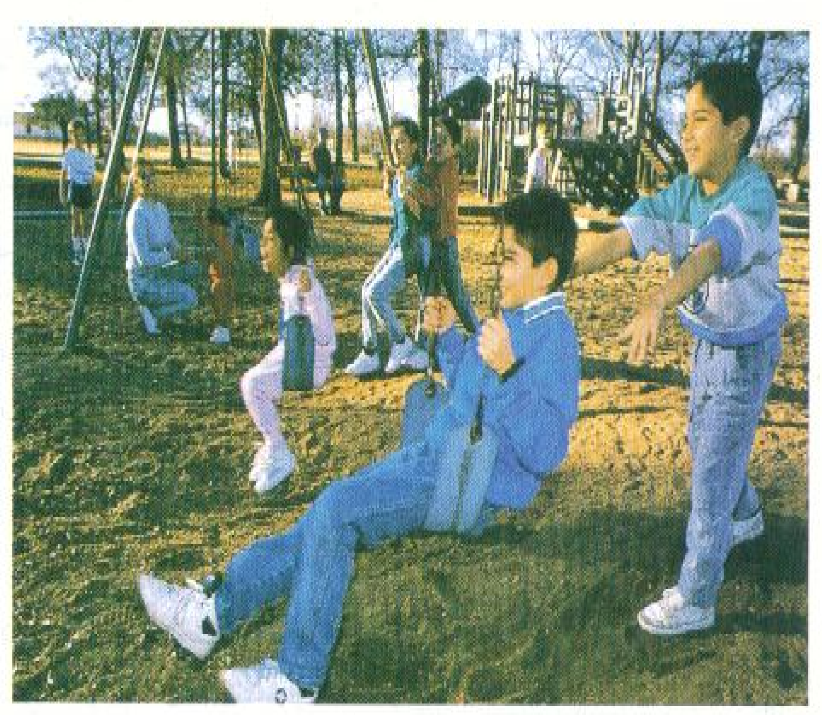
شكل 10-14:
تعتمد طريقة اهتزاز النظام على مقدار الطاقة المفقودة فيه .

فى أى نظام حقيقى مهتز لابد أن يفقد بعض الطاقة للتغلب على قوى الاحتكاك . ونتيجة لذلك تقل سعة اهتزاز البندول أو الكتلة المثبتة فى طرف زنبرك مهتز باستمرار بمرور الزمن ، وهذه الحقيقة موضحة بالشكل 10-14 . ويمثل الجزء (أ) الحالة المثالية لاهتزاز نظام خال من الاحتكاك ، وهذه هى الحالة السابق مناقشتها فى الأجزاء السابقة . أما الجزء (ب) فيمثل حالة أكثر واقعية ، حيث يتأثر الاهتزاز بوضوح نتيجة لوجود قوى الاحتكاك ، وعندئذ يقال لمثل هذا النظام بأنه نظام يتضائل (أو مخمد) ، ويلاحظ فى هذه الحالة أن سعة الاهتزاز تتضاءل بسرعة ملحوظة بمرور الزمن .

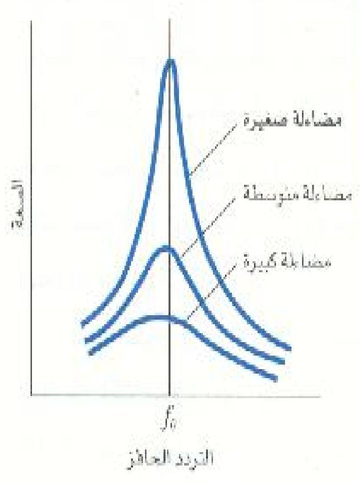
وعندما تكون قوى الاحتكاك كبيرة جدًا فإن النظام لا يهتز على الإطلاق ، ولكنه بدلاً من ذلك سوف يعود ببساطة إلى موضع اتزانه ببطئ شديد ، وهذا مبين بالشكل 10-14 جـ . ويوصف النظام فى مثل هذه الحالة بأنه زائد الضاءلة ، ويمكن أن يحدث هذا الموقف مثلاً إذا كانت الكتلة المثبتة فى طرف الزنبرك المهتز مغمورة فى سائل ذى لزوجة عالية جدًا . وفى مثل هذه الحالة لن تتحرك الكتلة بعد وصولها إلى موضع الاتزان ولن يشاهد الاهتزاز إطلاقًا . وإذا كانت قوى الاحتكاك كبيرة لدرجة تكفى بالكاد لكى يعود النظام إلى موضع الاتزان بدون أن يتجاوزه فإن النظام يوصف عندئذ بأنه خرج المضاءلة .

من الواضح إذن أنه لكي يهتز أى نظام لفترة ممتدة من الزمن لابد من تزويد النظام بالطاقة باستمرار لتعويض الطاقة المفقودة في بذل الشغل ضد قوى الاحتكاك . فمثلاً ، لكي تستمر أرجوحة الطفل فى التأرجح بسعة ثابتة لابد من دفع الأرجوحة من وقت لآخر لتزويد النظام بالطاقة .

ونحن نعلم أن هناك طريقة صحيحة وأخرى خاطئة لدفع الأرجوحة إذا أريد لـها أن تتأرجح إلى ارتفاعات عالية . والطريقة الصحيحة لتحقيق ذلك هى أن تدفع الأرجوحة فى اتجاه حركتها وليس في الاتجاه العكسي ، وهذه هي الطريقة الوحيدة لتزويد النظام بالطاقة بشكل فعال . أما إذا دفعت الأرجوحة فى عكس اتجاه حركتها فإن ذلك قد يؤدى إلى توقف الاهتزاز فى نهاية الأمر ؛ ذلك أن الجسم المهتز سوف يبذل شغلاً على العامل الدافع مما يؤدى إلى فقدان تدريجي للطاقة وتوقف الجسم في النهاية عن الاهتزاز . هذه الحقائق البسيطة لها أهمية كبيرة فى جميع أنظمة الاهتزاز القسرى أو المقود .



مثال للرنين : تزداد سعة اهتزاز الأرجوحة بسرعة عندما يقوم الشخص الواقف خلفها بدفعها دفعًا متطاورًا مع حركتها وبنفس تردد اهتزازاها .



شكل 11–14 :
سعة الاهتزاز القسرى كدالة فى التردد f عند ثبوت القوة الحافزة . f_0 هو تردد الرنين للاهتزاز غير المتضائل . المنحنيات الثلاثة تمثل نفس النظام المهتز ، ولكن بدرجات مختلفة من النظام .

فى حالة الأنظمة المقودة يستمر النظام فى الاهتزاز دائمًا بواسطة قوة تكرارية خارجية مؤثرة على النظام ، وقد يكون تردد هذه القوة f مساويًا أو غير مساو للتردد الطبيعي لاهتزاز النظام f_0 . وتصل فعالية العامل الحافز فى إمداد النظام بالطاقة إلى أقصاها عندما يكون $f = f_0$. وعند جميع الترددات الأخرى لن تكون القوى الحافزة متفقة في الطور تمامًا مع حركة النظام ، ولذلك يكون تأثير هذه القوة أقل فعالية فى إمداد النظام بالطاقة ؛ ويوضح الشكل 11–14 تغير سعة اهتزاز النظام مع تردد القوة المسلطة . لاحظ ، كما ذكرنا سابقًا أن فعالية القوة الحافزة فى إمداد النظام بالطاقة تكون أقصى ما يمكن عندما يكون ترددها f مساويًا للتردد الطبيعي f_0 للنظام ؛ وفى

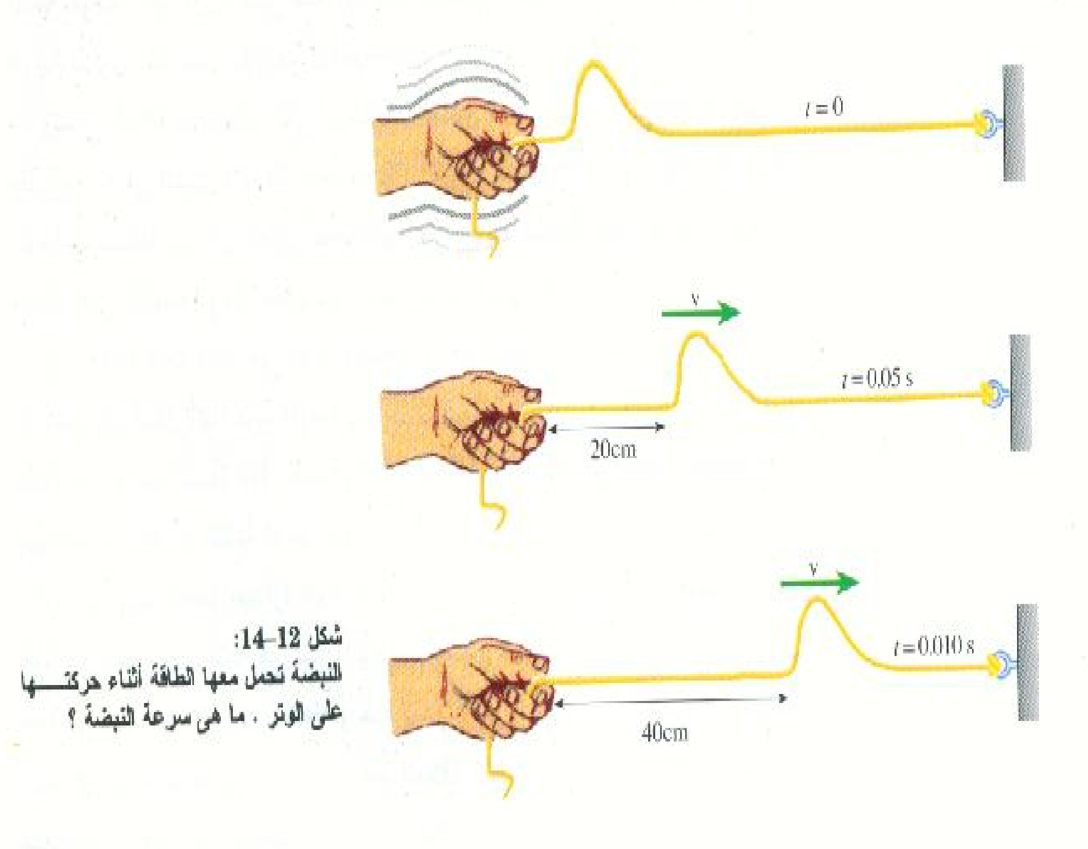
هذه الحال يقال أن القوة في حالة رنين مع النظام . هذا وسوف نتحدث تفصيلاً عن التردد f_0 ، الذي يسمى **بالتردد الرنيني** للنظام ، في القسم 10-14 .

14-8 المصطلحات الفنية للموجات

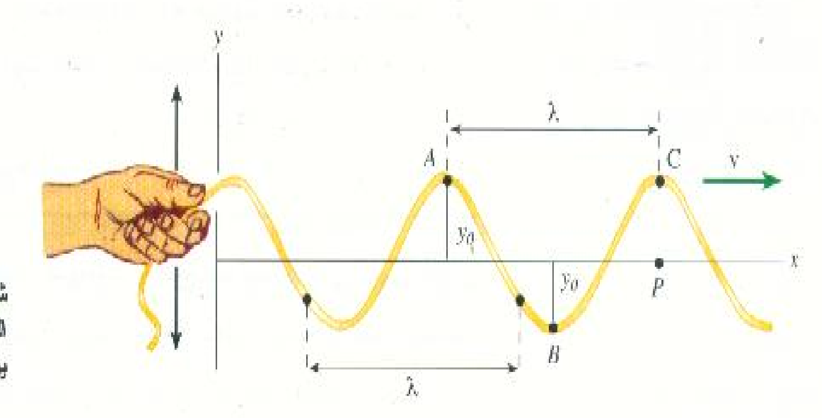
يعمل الكثير من الأجسام المهتزة كمصادر للموجات . فموجات الصوت على سبيل المثال يمكن أن تصدر من شوكة رنانة مهتزة أو وتر جيتار مهتز . وسوف نبدأ دراستنا للموجات بمناقشة نوع يمكن تخيله بسهولة ، وهو الموجة على وتر مشدود .

من الممكن إرسال اضطراب معين ليتحرك على الوتر كما هو مبين بالشكل 12-14 . ويبدأ هذا الاضطراب أو **النبضة** بحركة فجائية لليد إلى أعلى ثم إلى أسفل بسرعة كبيرة وهي ممسكة بطرف الوتر ، وعندئذ سوف يتحرك هذا الاضطراب على الوتر بسرعة v . لاحظ سمتين هامتين لمثل هذه النبضة . أولاً ، تحمل النبضة الطاقة وتنقلها معها بطول الوتر . فعندما تصل النبضة إلى نقطة معينة على الوتر فإنها تسبب اكتساب ذلك الجزء من الوتر طاقة حركة وطاقة وضع ، وهي الطاقة المستمدة من مصدر النبضة .

السمة الثانية هي أن النبضة تسجيل لما فعل المصدر . ويمكننا أن نرى من الشكل 12-14 أن اليد قد تحركت لبدء النبضة في لحظة معينة في الماضي . والواقع أن ما كان يفعله المصدر في أي لحظة ماضية t يظهر على الوتر على بعد قدره $x = vt$ من المصدر . ومعنى ذلك أن الوتر يتحرك على بعد x من المصدر نفس الحركة التي بدأها المصدر في لحظة سابقة $t = x/v$.



شكل 12-14:
النبضة تحمل معها الطاقة أثناء حركتها على الوتر . ما هي سرعة النبضة ؟



شكل 13-14:
المصدر المهتز فى حركة توافقية بسيطة يرسل موجة جيبية تتحرك على الوتر .

لنناقش الآن ما يحدث عندما يهتز المصدر فى حركة توافقية بسيطة ، كما هو مبين بالشكل 13-14 . من المتوقع عندئذ أن يحاكى الوتر نفس التاريخ القديم لطريقة اهتزاز طرفه بواسطة المصدر ، وأن الحركة إلى أعلى وإلى أسفل سوف تنتقل على الوتر بسرعة قدرها v ، وهى ما يطلق عليه **سرعة الموجة** . ونتيجة لذلك سوف يأخذ الوتر شكل منحنى جيب الزاوية فى أى لحظة ، وأن هذا الشكل الجيبى سوف يتحرك إلى اليمين بسرعة قدرها v حاملا مع الطاقة بطول الوتر ، وهى الطاقة السابق اكتسابها من المصدر .

وتستخدم لوصف مثل هذه الموجة كلمات معينة سنذكر أهمها فيما يلى . فالنقطتان A و C ، وهما قمتان على الشكل الموجى ، تسميان **قمتين موجيتين** ، بينما تسمى النقطة المماثلة للنقطة B **بالقيعان الموجية** . وتسمى أقصى إزاحة للوتر عن موقع اتزانه **بسعة الموجة** ، أى أن y_0 هى سعة الموجة الممثلة بالشكل 13-14 . لاحظ أن سعة الموجة تساوى فقط نصف الإزاحة الرأسية الكلية للوتر .

وتسمى المسافة بين قمتين على الموجة ، كالقمتين A و C مثلاً ، **بالطول الموجى** ، وقد رمزنا له فى الشكل 13-14 بالحرف λ (الحرف اللاتينى لامدا) . وهكذا فإن طول الموجة هو المسافة بين أى نقطتين متجاورتين على الموجة لهما نفس الطور ، أى أنه المسافة التى تقطعها الموجة خلال دورة اهتزاز كاملة لمصدر الموجات .

وإذا أخذنا نقطة ثابتة على الوتر كالنقطة P مثلاً سنجد أنها تتحرك حركة تكرارية إلى أعلى وإلى أسفل أثناء مرور الموجة بها خلال الحركة إلى اليمين . أى أنه خلال الزمن اللازم لكى يرسل المصدر طولاً موجبًا واحدًا لابد أن يمر طول موجى واحد بالنقطة P ، ويستنتج من ذلك أن النقطة P تمر بدورة كاملة واحدة من الحركة خلال نفس الزمن اللازم لكى يهتز المصدر اهتزازة كاملة واحدة . ومعنى ذلك أن دورة المصدر المهتز تساوى تمامًا دورة اهتزاز أى نقطة فى مسار الموجة ؛ ويسمى هذا الزمن اللازم لكى تهتز أى نقطة فى مسار الموجة اهتزازة كاملة واحدة **بدورة الموجة** T . وكما فى حالة النظام المهتز فإن تردد الموجة يرتبط بدورتها طبقًا للعلاقة $f = 1/T$. كذلك فإن التردد يساوى عدد القمم الموجبة المارة بالنقطة P فى كل ثانية .

وهناك علاقة هامة جدًا بين الطول الموجي والتردد . فإذا رجعنا مرة أخرى إلى الشكل 13-14 سنلاحظ أن المصدر يرسل طولاً من الموجة قدره λ خلال الزمن لاهتزازه اهتزازة كاملة واحدة T ، وعليه فإن الموجة تتحرك مسافة قدرها λ خلال الزمن T . وباستخدام العلاقة $v = x/t$ يمكننا أن نجد أن $v = \lambda / T$ ، حيث v سرعة الموجة . إذن :

$$\lambda = vT \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{v}{f} \qquad (14\text{-}17)$$

هذه العلاقة صحيحة لجميع الموجات ، وليس للموجات المتحركة على الأوتار فقط . ومن الضرورى الإشارة إلى أن التردد يتعين فيزيائيًا بتردد المصدر الموجى ، بينما تتعين سرعة الموجة بخواص الوسط الذى تنتقل فيه ؛ أما الطول الموجى فيساوى v/f طبقا للتعريف .

تعطى سرعة الموجة على الوتر بعلاقة بسيطة نذكرها هنا بدون إثبات . فإذا كان T هو الشد فى الوتر وكانت m كتلة جزء من الوتر طوله L فإن سرعة انتشار الموجة على الوتر تكون :

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \qquad (14\text{-}18)$$

ويمكن تفسير لماذا يجب أن تعتمد سرعة الموجة على الشد فى الوتر وكتلة وحدة الطول منه كالتالى . الشد بالطبع هو المسئول عن القوة المسببة لتسارع قطعة الوتر عند مرور النبضة بمنطقتها ، وكلما زاد الشد كلما زادت العجلة وبالتالى زادت سرعة حركة النبضة . ومن جهة أخرى كلما زادت كتلة الوتر كلما كان عزم قصوره الذاتى كبيرًا ، ولذلك يجب أن تؤثر كتلة وحدة الطول من الوتر على سرعة حركة النبضة . وحيث أن عزم القصور الذاتى للوتر السميك يكون كبيرًا فإن سرعة النبضة عليه ستكون منخفضة نسبيًا .

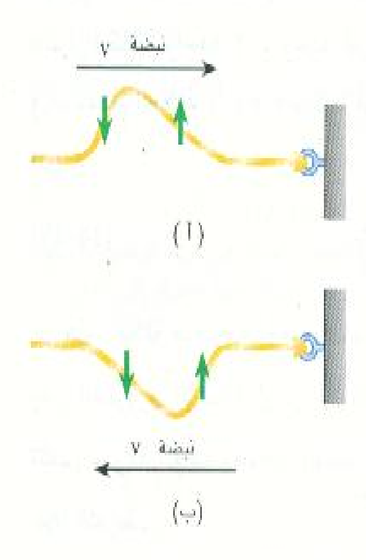
مثال توضيحى 2-14

وتر جيتار كتلته 2.0 g وطوله 60 cm . ما قيمة الشد اللازم فى الوتر لكى تكون سرعة الموجة عليه 300 m/s ؟

استدلال منطقى : يمكن كتابة المعادلة 18-14 على الصورة $T = (m/L)(v^2)$ وحيث أن $v = 300$ m/s و $m = 0.0020$ kg و $L = 0.60$ m ، إذن $T = 300$ N . لاحظ أن هذا الشد كبير جدًا ، فهو يكافئ وزن كتلة قدرها 30 kg تقريبًا معلقة فى الوتر . ■

14-9 انعكاس الموجة

لكي تنتقل الموجة على الوتر الموضح بالشكل 14-13 ، يجب أن يكون هذا الوتر مثبتًا تثبيتًا جيدًا من طرفه الأيمن . وحيث أن الموجة لا يمكن أن تستمر في الحركة إلى ما بعد نقطة التثبيت ، يتحتم علينا مناقشة ما يحدث للطاقة التي تحملها الموجة لأن الطاقة لا يمكن أن تختفي . وهنا يمكن أن يحدث شيئان : (1) قد يمتص بعض الطاقة بواسطة الحامل عند نقطة التثبيت ، (2) قد ينعكس بعض الطاقة إلى الخلف ، وبذلك تتحرك الموجة على الوتر إلى اليسار . ولتبسيط المناقشة سوف نفترض أن الامتصاص مهمل وأن الطاقة كلها تنعكس خلفًا ، وهذا صحيح تقريبًا في معظم الحالات .



شكل 14-14:
تنقلب النبضة المتحركة على الوتر عند الانعكاس من الطرف الثابت . تبين الأسهم الرأسية حركة أجزاء الوتر المختلفة .

ولدراسة هذه الظاهرة لنتبع نبضة موجية واحدة تتحرك على الوتر إلى اليمين ، كما هو مبين بالشكل 14-14 أ . عندما تصل هذه النبضة إلى الحامل فإنها تؤثر عليه بقوة معينة إلى أعلى ، وحيث أن الحامل مثبت في مكانه فإنه لن يتحرك ، ولكنه سوف يؤثر على الوتر بقوة مساوية ومعاكسة إلى أسفل ، وهذه القوة سوف تسبب بالتالي تسارع الوتر إلى أسفل لينخفض بذلك عن موضع الاتزان مسافة تعتمد على كمية تحركه . ونتيجة لذلك تنقلب النبضة رأسًا على عقب عند اصطدامها بالحامل ؛ ولذلك تبدو النبضة المنعكسة كما هو موضح بالشكل 14-14 ب . وإذا كان الوتر حرًا تمامًا في أن يتحرك إلى أعلى وإلى أسفل عند الطرف الأيمن فإن النبضة لن تنقلب بالرغم من أنها سوف تنعكس لأن الطاقة لا يمكن أن تختفي هكذا ببساطة عند الطرف الأيمن للوتر . وتلخيصًا لذلك نقول أن **الموجة تنقلب بالانعكاس عند الطرف الثابت ، وتنعكس بدون انقلاب عند الطرف الحر .**

ولنعتبر الآن ما يحدث عند التقاء نبضة منعكسة متحركة على وتر إلى اليسار مع نبضة أخرى متحركة على نفس الوتر تجاه اليمين . يمثل الشكل 14-15 أ نبضتين مستطيلتين* تتحركان في اتجاهين متضادين على نفس الوتر . عندما تلتقي هاتان الموجتان سوف تبدأن في التراكب إحداهما مع الآخرى . وعندئذ سيكون الموقف كما هو مبين بالشكل 14-15 ب ، حيث يمثل الخطان المتقطعان موضعي كل من الموجتين وحدها عندما لا تكون الأخرى موجودة ، بينما يمثل الخط الأخضر الإزاحة الفعلية في

* قد يتساءل بعضنا عن طريقة الحصول على نبضة موجية بهذا الشكل . الحقيقة أنه يمكن الحصول على نبضة موجية بأي شكل نريد ، بما في ذلك النبضات المستطيلة الشكل ، باستخدام مجموعة كبيرة من النبضات الموجية ذات الترددات المختلفة في نفس الوقت . ويمكن تحقيق ذلك عادة باستخدام دوائر إلكترونية معينة للحصول على نبضات كهربائية بالشكل المطلوب . وقد استخدمنا هنا نبضات افتراضية مستطيلة الشكل لأنها ثابتة السعة ، ومن ثم يكون جمع السعات في حالة التراكب أبسط مما في حالة الأشكال الموجية الأخرى .







تمثل هذه المجموعة المتتابعة من الصور نبضة موجية تتحرك على حبل في الاتجاه إلى اليمين ثم تنعكس عند النهاية الثابتة للوتر . لاحظ أن النبضة المنعكسة المتحركة إلى اليسار مقلوبة بالنسبة إلى الموجة الساقطة .

حالة التراكب . ويتضح بناء على ذلك أن صافي الإزاحة يساوي المجموع الاتجاهي لإزاحتي الموجتين ، وهذا مثال لما يسمى **مبدأ التراكب :**

إذا وقعت نقطة تحت تأثير نبضتين موجيتين أو أكثر في نفس الوقت فإن إزاحتها المحصلة تساوي المجموع الاتجاهي للإزاحات الناتجة عن النبضات المنفردة .

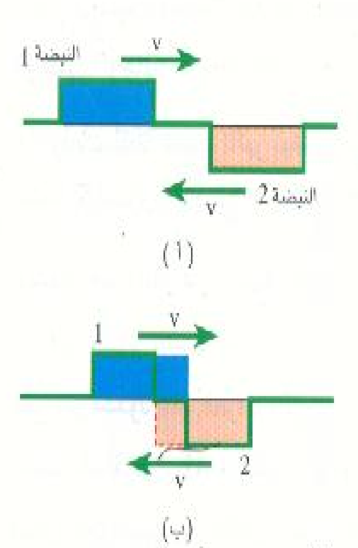
وينطبق هذا المبدأ على جميع الموجات التي نتعامل معها في هذا الكتاب .

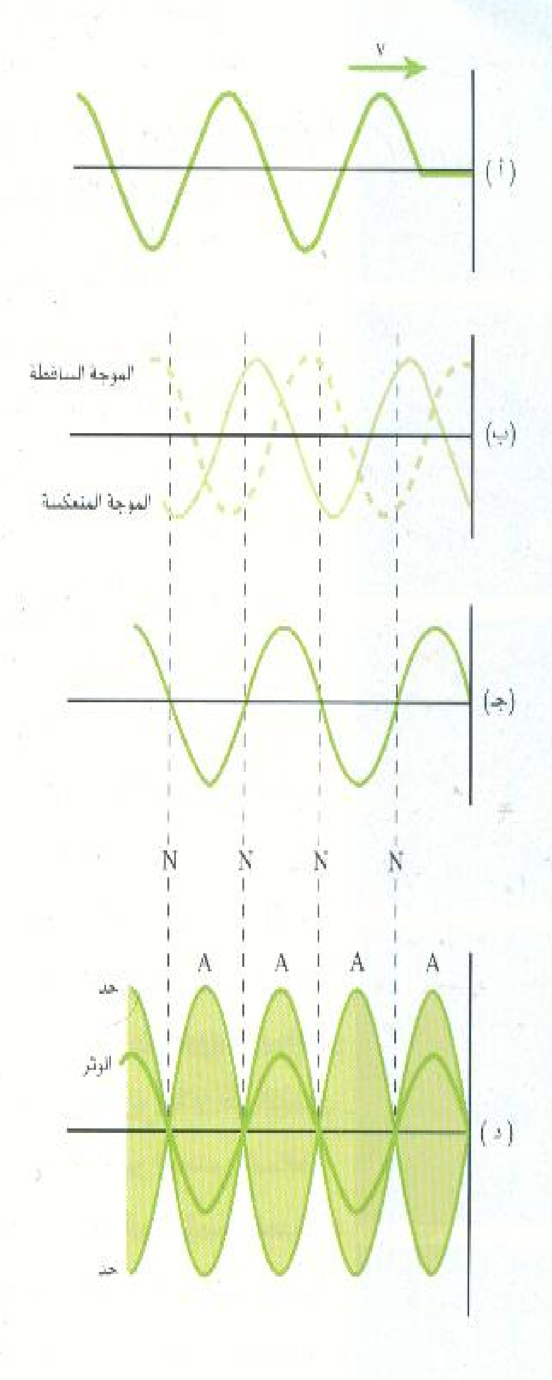
الآن يمكننا تطبيق هذا المبدأ لنرى ما يحدث عندما تنعكس موجة جيبية متحركة على وتر مشدود عند الطرف الثابت ، وهذا الموقف موضح بالشكل 16-14 . عندما تصل النبضة الساقطة إلى نقطة التثبيت فإنها تنعكس وتنقلب كما هو مبين بالجزء (أ) . ويمثل الجزء (ب) من الشكل موجتان افتراضيتان إحداهما ساقطة والأخرى منعكسة . وقد وصفت الموجتان بأنهما « افتراضيتان » لأن الوتر نفسه لا يخضع لأي منهما على حدة ، بل إنه يقوم بجمع الموجتين ويتخذ الشكل المبين بالجزء (جـ) في اللحظة التي تمثل موضعي الموجتين الساقطة والمنعكسة في الجزء (ب) . لاحظ أن إزاحة الوتر عند نقطة التثبيت تساوي صفرًا ، وأنها يجب أن تكون صفرًا دائمًا . وبالإضافة إلى ذلك يلاحظ أن الإزاحة تساوي صفرًا أيضًا عند عدة نقط أخرى في نفس اللحظة .

بهذا نكون قد وصلنا إلى أهم جزء في الموضوع . لنفرض أننا قد أعدنا رسم الشكل 16-14 ب عند أية لحظة أخرى . إذا فعلنا ذلك سوف نجد أنه بالرغم من أن الموجتين الساقطة والمنعكسة تحتلان موضعين مختلفين في الرسم الجديد ، فإن مجموعهما سيظل صفرًا عند نفس النقط المبينة في الجزء (جـ) . أي أن الوتر لا يتحرك إطلاقًا عند النقطة N في هذا الشكل . وإذا راقبنا هذا الوتر أثناء حركته تحت تأثير الموجتين الساقطة والمنعكسة فإنه يبدو لنا ضبابيًا غير واضح أثناء اهتزازه ذهابًا وإيابًا بين الحدين الموضحين بالجزء (د) . وتسمى النقط N التي لا تتحرك إطلاقًا **بالعقد** ؛ بينما تسمى النقطة A الواقعة في منتصف المسافة بين كل عقدتين والتي تعاني أكبر حركة ، **بالبطون .** ويعرف هذا النوع من الاهتزاز الذي يهتز فيه الوتر ذهابًا وإيابًا داخل غلاف (أو منحنى حدي) واضح تمامًا **بالموجة المستقرة (أو الواقفة)** ، وهي ما سنتعرض لمناقشته ببعض التفصيل بعد قليل .

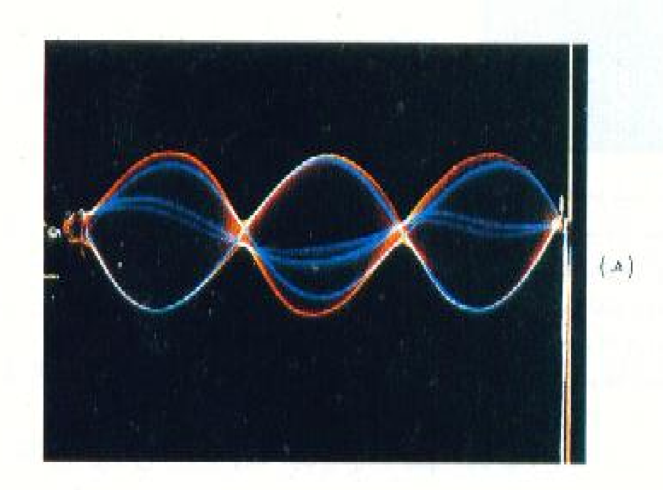
والآن إذا نظرنا إلى الموضع اللحظي للوتر في الجزء (د) يمكننا القول أن العقد تبعد عن بعضها البعض مسافات تساوي نصف الطول الموجي . وبالمثل ، فإن المسافة بين بطنين متتاليين تساوي $\frac{1}{2}\lambda$ أيضًا . علينا إذن أن نتذكر الحقيقة الهامة الآتية :

المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليين في الموجة المستقرة تساوي $\frac{1}{2}\lambda$.



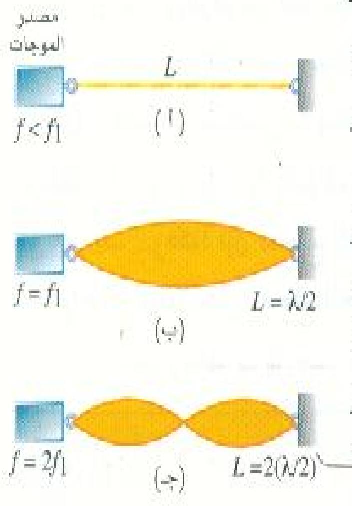


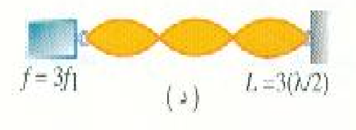
شكل 15-14:
مبدأ التراكب . الخط الأخضر يوضح الشكل الفعلي للوتر أثناء حركة النبضتين الزرقاء والحمراء عليه في اتجاهين متضادين . (أ) قبل التراكب يأخذ الوتر شكل النبضتين المنفردتين . (ب) في منطقة التراكب تجمع سعتا النبضتين جبريًا ، ولذلك تكون الإزاحة المحصلة للوتر صفرًا في هذه الحالة .

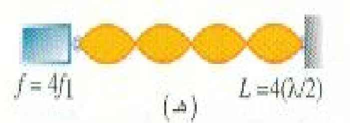


شكل 16-14:
ينتج الموجة الساقطة ، أو الرنين ، للوتر المهتز عندما تقوى الموجتان الساقطة والمنعكسة إحداهما الأخرى . وتسبب محصلة الموجتين الساقطة والمنعكسة تكون العقد والبطون على الوتر (سعة كل من الموجتين في الأجزاء (أ) إلى (د) مبالغ فيه كثيرًا) (هـ) صورة فوتوغرافية للوتر كما في الجزء (د) .

14-10 الرنين الموجي : الموجات المستقرة على وتر







شكل 17-14:
رنين وتر مشدود .

عند تحريك بندول أو أرجوحة أطفال أو كتلة مثبتة في طرف زنبرك باستخدام قوة دورية يتحرك النظام بأكبر سعة عندما يكون تردد القوة مساويًا للتردد الطبيعي لاهتزاز النظام . وقد استخدمنا في القسم 7-14 مثال دفع أرجوحة الأطفال لإثبات ظاهرة الرنين ، أي اهتزاز النظام بأكبر شدة ممكنة عند تساوي تردد القوة الحافزة مع تردد الاهتزاز الحر للنظام . ويوجد موقف مشابه لذلك في حالة اهتزاز الأوتار ، كما هو موضح بالشكل 17-14 . فإذا قمنا بهز الوتر بتردد منخفض جدًا فإن الوتر سيهتز اهتزازًا ضعيفًا جدًا بحيث يبدو عديم الحركة ، كما بالشكل 17-14 أ . وبزيادة تردد الاهتزاز ببطئ سوف يبدأ الوتر في الاهتزاز بقوة عند تردد معين ، كما بالشكل 17-14 ب . وعند هذا التردد الرنيني الأساسي f_1 يهتز الوتر اهتزازًا واسعًا ويظهر كشيء ضبابي غير واضح المعالم بين الحدين الموضحين ، وهذا مثال واضح لظاهرة الموجات المستقرة المذكورة آنفًا هذا وتبين التجربة أن الوتر يرن أيضًا عند ترددات أعلى أخرى ، كما هو مبين بالأجزاء (ب) ، (جـ) ، (د) من الشكل . وملخص ذلك أن حالة رنين الوتر تحدث عند التردد الأساسي f_1 ، وعند ترددات أعلى قدرها $2f_1$ ، $3f_1$ ، $4f_1$ . . . . وهكذا .

وهناك طريقة سهلة لتحديد الشروط التي يحدث عندها الرنين . فبالنظر إلى الشكل 17-14 يمكننا ملاحظ أن الوتر يرن في قطع صحيحة ـ حيث تعني **القطعة** المسافة بين عقدتين متجاورتين أو بطنين متجاورين ـ وأن الطرفين الثابتين عقدتان دائمًا . وعليه فإن الوتر يرن عندما يساوي طوله قطعة واحدة أو قطعتين . . . وهكذا . وحيث أن طول القطعة $\frac{1}{2}\lambda$ فإن ذلك يعني حدوث الرنين عندما يكون طول الوتر $\lambda/2$ أو $2(\lambda/2)$ أو $3(\lambda/2)$ . . . وهكذا ، وبذلك يمكننا القول عمومًا أن الوتر المثبت بشدة من طرفيه يمكن أن يرن إذا كان طوله عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجي . فمثلاً طول الوتر في الشكل 17-14 ب ـ د يساوي $\lambda/2$ و $2(\lambda/2)$ و $3(\lambda/2)$ و $4(\lambda/2)$. إذن ، يمكن كتابة شرط الرنين في حالة وتر مثبت من طرفيه على الصورة :

$$L = n\frac{\lambda_n}{2} \qquad (14\text{–}19)$$

حيث $n = 1, 2, 3, ...$ ؛ λ_n هو الطول الموجي عندما يرن الوتر في عدد قدره n من القطع . وحيث أن الطول الموجي يرتبط بالتردد تبعا للمعادلة (17-14) ، يمكننا أن نرى مباشرة أن رنين الوتر المثبت من طرفيه يحدث فقط عند ترددات خاصة جدًا ، ويقال عندئذ أن الترددات الرنينية للوتر تكمية ، بمعنى أن هذه الترددات لها قيمة حادة محددة يفصل بينهما ثغرات من الترددات المحظورة . ومن الواضح أن قيم الترددات الرنينية تساوي مضاعفات صحيحة للتردد الرنيني الأساسي f_1 :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L/n} = n\frac{v}{2L} = nf_1$$

وترتبط الترددات الرنينية للأوتار المشدودة عادة بالأصوات الموسيقية الصادرة عن الآلات الوترية . وبالرغم من أننا سوف نرجئ المناقشة التفصيلية للصوت إلى الفصل التالى ، فإن هذه العلاقة تعطينا بعض المفردات الإضافية المستخدمة لوصف الموجات المستقرة . فالتردد الأساسى f_1 يسمى أحيانًا **بالتوافقية الأولى** ، بينما تعرف الترددات f_1 ، f_2 ، f_3 ، f_4 **بالتوافقيات الثانية والثالثة والرابعة والتوافقية رقم** n على الترتيب . وهكذا فإن مصطلح **التوافقية** يشير إلى **اهتزاز موجى جيبى ذى تردد واحد** ، بينما يشير مصطلح **الحركة التوافقية البسيطة** إلى حركة دورية ذات تردد واحد يمكن وصفها بدالة جيب أو جيب تمام .

مثال 14-5 :

وتر طوله 6.0 m وسرعة الموجات عليه 24 m/s . ما هى ترددات القوة الحافزة التى يرن عندها هذا الوتر ؟ ارسم شكلاً للوتر عند التوافقيات الثلاث الأولى .

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو شرط الرنين الموجى للوتر ؟

الإجابة : يجب أن يكون طول الوتر عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجى ، ويمثل هذا الشرط رياضيًا بالمعادلة :

$$L = n\left(\frac{\lambda_n}{2}\right) \quad \text{أو} \quad \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

سؤال : ما هى علاقة هذه الأطوال الموجية الرنينية بالترددات الرنينية ؟

الإجابة : العلاقة بين الترددات والأطوال الموجية لكل الموجات هى $v = f\lambda$. وفى حالتنا هذه :

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n}$$

سؤال : ماذا سيكون شكل الموجات الرنينية الثلاث الأولى ؟

الإجابة : الموجة الرنينية مصطلح آخر للموجة المستقرة . وبالنسبة للموجات المستقرة الثلاث الأولى سيأخذ الوتر الشكل الموجى لعروة واحدة أو اثنتين أو ثلاث عروات بين طرفيه الثابتين ؛ وهذا موضح بالشكل 17-14 ب ، جـ ، د .

الحل والمناقشة : باستخدام معطيات المثال نجد أن الأطوال الموجية الثلاث الأولى كالتالى :

$$\lambda_1 = \frac{12m}{1} = 12 \text{ m}$$

$$\lambda_2 = \frac{12m}{2} = 6.0 \text{ m}$$

$$\lambda_1 = \frac{12m}{3} = 4.0\text{ m}$$

وتكون الترددات المناظرة كالتالى :

$$f_1 = \frac{24\text{ m/s}}{12\text{ m}} = 2.0\text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{24\text{ m/s}}{6.0\text{ m}} = 4.0\text{ Hz}$$

$$f_3 = \frac{24\text{ m/s}}{4.0\text{ m}} = 6.0\text{ Hz}$$

مثال : إذا كان الوتر يرن فى ثلاث قطع عند التردد $f = 11$ Hz ، فما هى سرعة الموجات ؟

الإجابة : 44 m/s .

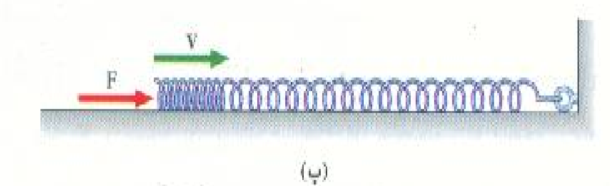
14-11 الموجات المستعرضة والطولية

لقد استنفدنا وقتًا طويلاً فى مناقشة الموجات المنتشرة على وتر مشدود لأننا نستطيع رؤية الشكل الموجى للوتر بسهولة ، كما أن المبادئ التى تنطبق عليها تنطبق أيضًا على كثير من الأنظمة المهتزة الأخرى . والموجات على الأوتار ما هى إلا مثال للموجات **المستعرضة** . وقد أطلق هذا الاسم عليها لأن جسيمات الوتر ـ أو جسيمات **الوسط** التى تنتشر فيه الموجات عمومًا ـ تتحرك فى اتجاه عمودى (أو **مستعرض**) على اتجاه انتشار الموجة . فمثلاً ، عندما تنتشر الموجة على وتر من اليسار إلى اليمين يتحرك الوتر نفسه إلى أعلى وإلى أسفل .

سوف نتعرف الآن على نوع آخر من الموجات بمساعدة التجربة الآتية . يستخدم فى هذه التجربة زنبرك طويل موضوع على سطح منضدة ملساء ومثبت من أحد طرفيه ، ويوضح الشكل 18-14 أ الزنبرك فى حالة الاتزان . والآن إذا ضغط الزنبرك فجأة كما فى الجزء (ب) فإن الحلقات القريبة للطرف الذى سلطت عليه القوة الضاغطة سوف تنضغط قبل أن يتعرض باقى الزنبرك إلى الاضطراب . ونتيجة لقوى المرونة المتولدة فى هذا الجزء من الزنبرك سوف تؤثر الحلقات المنضغطة بقوة معينة على الحلقات الواقعة على يمينها ، وبذلك ينتقل الانضغاط بطول الزنبرك إلى اليمين . وعندما يصل الانضغاط إلى الطرف المثبت تنعكس الطاقة الانضغاطية ، وبذلك ينعكس الانضغاط ليتحرك إلى اليسار ، كما هو مبين فى (د) .

من الواضح أن هذه الموجة ليست مستعرضة لأن أجزاء الزنبرك تهتز ذهابًا وإيابًا فى نفس اتجاه انتشار الموجة بطول الزنبرك . وتسمى مثل هذه الموجة التضاغطية ، التى تتحرك فيها جسيمات الوسط فى اتجاه انتشار الموجة **بالموجة الطولية** .

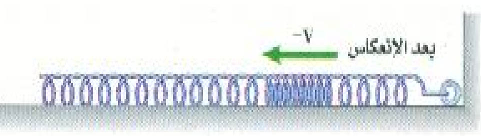
(أ)



(ب)

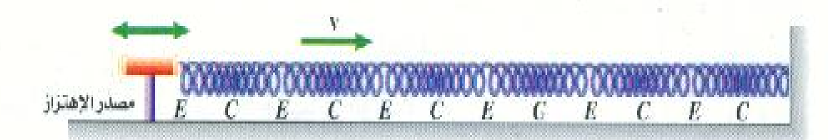
قبل الإنعكاس
V

(جـ)

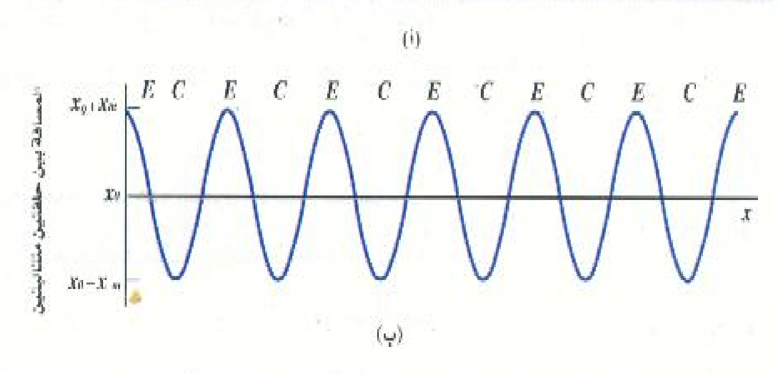


(د)

شكل 18-14:
نبضة طولية تتحرك بطول الزنبرك ثم تنعكس عند الطرف الثابت .



(أ)



(ب)

شكل 19-14:
(أ) موجة طولية مكونة من تضاغطات وامتدادات متعاقبة على زنبرك . (ب) منحنى التضاغطات C والامتدادات E للزنبرك والمبينة في الشكل 19-14 أ. قيمة x_0 تمثل المسافة الفاصلة بين الحلقات عندما لا يكون الزنبرك مضطربًا .

ويمكننا توليد موجة طولية مستمرة بتوصيل الطرف الحر للزنبرك بمصدر مهتز يقوم بدفع هذا الطرف وشده بالتناوب بتردد f ، وعندئذ سوف ترسل بطول الزنبرك مناطق مكدسة الحلقات بالتناوب مع مناطق ممتدة الحلقات ، وهذا موضح بالشكل 19-14 أ . فإذا كان مصدر الاهتزاز يقوم بتحريك طرف الزنبرك حركة توافقية بسيطة ، يمكن تمثيل المسافة بين الحلقات المتجاورة على الزنبرك بالمنحنى المبين بالشكل 19-14 ب . **لاحظ أن التغير في امتداد وانضغاط الحلقات يتبع منحنى جيبيًا .**

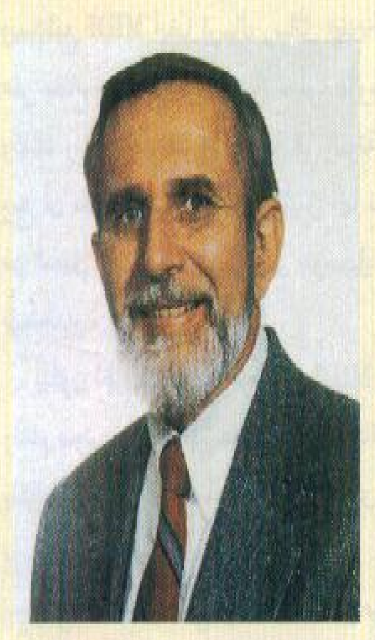
إضافة إلى ما سبق نقول أن هذا النسق الموجي من التضاغط والامتداد يتحرك بطول الزنبرك بسرعة معينة تتوقف على خواص الزنبرك . ويمكننا وصف الموجة الطولية بمساعدة الشكل 19-14 ب بدلالة نفس المصطلحات السابق استخدامها في حالة الموجات المستعرضة . فالطول الموجي هو المسافة بين أي تضاغطين متتاليين أو أي امتدادين

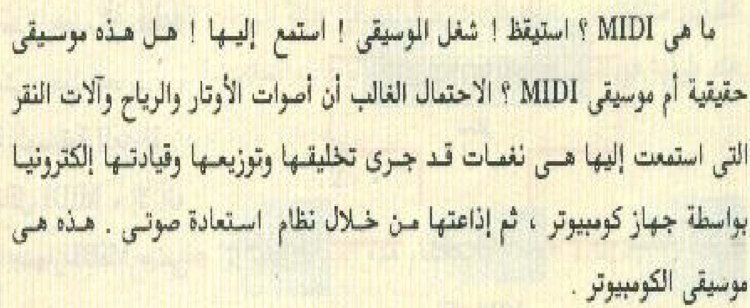
متتاليين . والسعة هى الفرق بين المسافة الفاصلة بين حلقتين متجاورتين عند أقصى انضغاط (أو أقصى امتداد) والمسافة بينهما فى حالة اتزان الزنبرك . كذلك فإن نفس العلاقة بين السرعة v والتردد f والطول الموجى λ ، أى العلاقة $v = f\lambda$ ، تظل صحيحة أيضًا فى حالة الموجات الطولية .

وتعتبر الموجات الصوتية واحدة من أهم أمثلة الموجات الطولية ، وهذا سوف يكون موضوع دراستنا فى الفصل التالى .

الفيزيائيون يعملون فيكتور أ . ستانيونيس ، كلية أيونا

موسيقى الكومبيوتر : العلم والتكنولوجيا لفن جديد





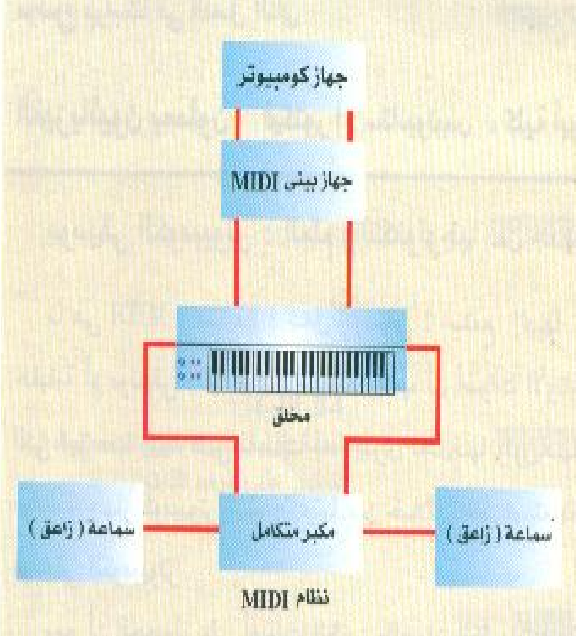
ما هى MIDI ؟ استيقظ ! شغل الموسيقى ! استمع إليها ! هل هذه موسيقى حقيقية أم موسيقى MIDI ؟ الاحتمال الغالب أن أصوات الأوتار والرياح وآلات النقر التى استمعت إليها هى نغمات قد جرى تخليقها وتوزيعها وقيادتها إلكترونيا بواسطة جهاز كومبيوتر ، ثم إذاعتها من خلال نظام استعادة صوتى . هذه هى موسيقى الكومبيوتر .

ومع أن الحصول على أصوات الطنين والصراخ إلكترونيًا قد تحقق بنجاح على نطاق تجريبى منذ زمن طويل ، إلا أنها نادرًا ما كانت تستخدم خارج المختبرات الجامعية والصناعية . ومع بداية الستينيات من هذا القرن تحقق النجاح الباهر فى تسجيل « موسيقى باخ » المخلقة إلكترونيا ، وتعرف جمهور العامة على هذا النوع من الموسيقى . ومنذ ذلك الحين تحولت دنيا الموسيقى إلى العصر الإلكترونى واندفعت كالمنجنيق إلى عالم الكومبيوتر .

كان الصوت فى « موسيقى باخ » بسيطًا « ورقيقًا » ، وكان يعتمد على الصوت المولد باستخدام جهاز تخليق رقمى يسمى MOOG . ومن المفهوم أن هذا التسجيل كان يفتقر إلى الأصوات المعقدة التى تصدرها الآلات الموسيقية التقليدية بكل ما يصاحبها من النغمات التوافقية . ومع أن الموسيقيين قد حاولوا حل هذه المشكلة محاولات مضنية باستعمال عدد من المخلقات التى تعزف فى نفس الوقت ، إلا أن مشاكل عدم الاتساق بين هذه المخلقات أثبتت فشل هذه الطريقة فشلاً ذريعًا فى محاكاة الآلات الموسيقية التقليدية .

وفى أوائل الثمانينيات ابتكر الفيزيائيون والمهندسون طريقة لتخليق أصوات الآلات الموسيقية القديمة وتوليد أصوات آلية جديدة باستخدام تكنولوجيا الكومبيوتر الرقمى ، حيث استبدل صراخ المخلقات الرقمية بموسيقيين يستخدمون نظام MIDI الموسيقى والكومبيوتر . ويبدو هذا كما لو كان لديك فرقة موسيقية أو أوركسترا فى داخل الكومبيوتر ، وأن هذه الفرقة تعزف لك ما تريد من الموسيقى وبالطريقة التى تطلبها تمامًا . وفى التخليق الرقمى تولد الفولتيات الواصلة إلى السماعات من معادلات رياضية محملة فى المخلق ؛ ويحتوى كل مخلق رقمى على معالجة ميكروئية واحدة على الأقل .

MIDI هي كلمة أولية مكونة من الحروف الأولى لعبارة « الجهاز البيني الرقمي للآلات الموسيقية »[*] ، ويتكون MIDI من أجهزة حاسب وبرامجيات قياسية قام بتصميمها صانعو الأجهزة الإلكترونية لتحقيق الانسجام بين الآلات الموسيقية المختلفة . ويستخدم كل مخلق طريقة لتوليد الصوت ومحاكاة الأصوات الآلية المختلفة ، ولذلك فإن بعض المخلقات أفضل في محاكاة صوت البيانو وبعضها الآخر أفضل في محاكاة صوت الجيتار . وقد أدت الحاجة إلى الحصول على أفضل الأصوات من كل مخلق إلى ابتكار أسلوب لتوصيلها بطريقة متسقة ، وهو ما يعرف بنظام MIDI القياسي .



ويحدد نظام MIDI القياسي الأشياء الضرورية كهيئة البيانات المنقولة خلاله وكذلك نوع الوصلة الفيزيائية ـ ناقل MIDI ـ المركبة في الآلة والوصلات المصاحبة ، كما أنه يحدد أيضًا فلطية الإشارات ومعدل إرسالها . وتعرف الآلات التي يمكنها استقبال وإرسال شفرات MIDI بأجهزة MIDI . ويستطيع MIDI أيضًا إرسال رسائل تبين متى يجب أن يضغط على مفتاح معين في لوحة المفاتيح أولاً ، ومتى يجب تحريره ، وكذلك رسائل عن الفروق الدقيقة في النوتة الموسيقية المعزوفة . ومع أن معظم أجهزة الكومبيوتر ليس بها ناقل MIDI ، إلا أنه من السهل تحويل ناقل التوالي بتوصيل جهاز MIDI بيني باستخدام « فيشة » واحدة .

يتكون نظام موسيقى الكومبيوتر MIDI ، كما هو مبين بالشكل ، من جهاز كومبيوتر وجهاز MIDI بيني ومخلق موسيقى ونظام صوتي . ويستطيع هذا النظام محاكاة أصوات أكثر الآلات الموسيقية تعقيدًا ، ويمكنه وحده إحياء حفل لموسيقى الروك بتكاليف بسيطة في متناول الشباب العادي . وباستخدام البرامجيات المناسبة يمكن تحويل الكومبيوتر الشخصي إلى مركز موسيقي راق على أحدث المستويات .

إنني كأستاذ جامعي أبحث دائمًا عن طرق جديدة لإثارة طلابي وإمتاعهم بموضوعاتهم الدراسية . وقد منحني حلول عصر الكومبيوتر والجاذبية الساحرة للموسيقى وسيلة ذهبية لتدريس الفيزياء بطريقة غير تقليدية ، وخاصة للطلاب غير المتخصصين في الفيزياء ، وذلك بمساعدة موسيقى الكومبيوتر .

14-12 الموجات التضاغطية المستقرة على زنبرك

هناك سمات مشتركة كثيرة بين الموجة الطولية على زنبرك والموجة المستعرضة على وتر . فإذا أرسلت موجة طولية لتتحرك على زنبرك فإن الموجة وطاقتها تنعكسان دائمًا عند وصول الموجة إلى طرف الزنبرك ، وهذه الموجة المنعكسة يمكنها أن تتداخل مع الموجات التي يرسلها المصدر في لحظات تالية . فإذا تحققت العلاقة المناسبة بين تردد المصدر ومختلف ثوابت الزنبرك سوف يحدث الرنين ، وهذا ما سندرسه الآن .

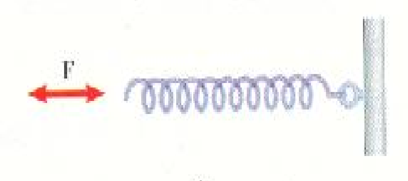
كما في حالة رنين الأوتار ، توجد دائمًا عقدة بالقرب من المصدر الحافز في نظام

* Musical Instrument Digital Interface MIDI .

الزنبرك لأن الزنبرك يتحرك فى حالة الرنين حركة أكبر كثيرًا مـن المصدر . وأيضًا إذا كان الطرف الآخر للزنبرك مثبتًا تثبيتًا جيدًا يمنعه من الحركـة ، فـإن هـذا الطـرف سيكون عقدة كذلك ، وتمثـل الحركـة الرنينيـة للزنـبرك عندئـذ بالمنحنيـات الموضحـة بـالشكل 14-20 . تذكر أن هذه المنحنيات لا توضح الشكل الحقيقى للموجة الطولية علـى الزنـبرك . (وعلـى العكس من ذلك ، تـوضح هـذه المنحنيات بالفعل الشكل الموجى الحقيقى فى حالة الموجات المستعرضة) . ولكنها توضح إزاحة كل نقطـة علـى الزنـبرك عـن موضـع اتزانها ، ومن الواضح أن هذه الإزاحات فى اتجاه المحور x تتغير تغيرًا جيبيًا مع x . وتوجد العقد عند تلك النقط التى تتلاشى فيها الموجـة المتحركـة إلى اليمـين مـع الموجـة المتحركة إلى اليسار ، تاركتين الزنبرك بدون انضغاط أو امتداد . وتتحقق شـروط حـدوث الموجة المستقرة عندما يكون طول الزنـبرك مسـاويًا أضعافًا صحيحـة قـدر المسـافة بـين عقدتين متتاليتين . وعليه فإن شرط الرنين فى حالة الموجات الطولية على زنبرك مثبـت عند طرفيه هو نفس شرط الرنين فى حالة الموجات المستعرضة :

$$n\frac{\lambda_n}{2} = L$$

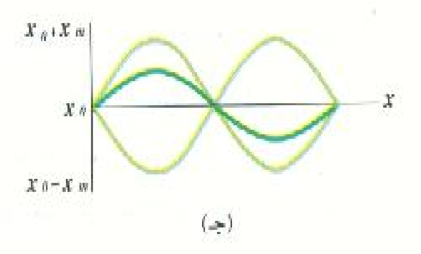
حيث $n = 1, 2, 3, \ldots$. وباستخدام هذه العلاقة جنبًا إلى جنب مع العلاقة بين الطول



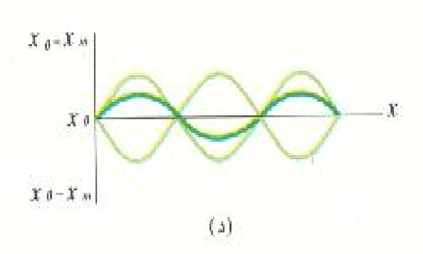
(أ)

X_0+X_m, X_0, A, $x = L$, X, X_0-X_m

(ب)



(جـ)



(د)

شكل 20-14:
الموجات المستقرة الناتجة عن الاهـتزاز الطولى لزنبرك . هذه المنحنيـات تصـف المسافات بين كل حلقتين متجاورتين كمـا فى الشكل 19-14 ، ولكنها لا تمثل الشكل الحقيقى للزنبرك .

الموجي والتردد ، $\lambda = v/f$ ، يمكننا أن نرى مباشرة أن الترددات الرنينية للزنبرك (أي الترددات التوافقية) تكون كالتالي :

$$f_n = n\frac{v}{2L}$$

حيث $n = 1, 2, 3, \ldots$.

14-6 :

يرن زنبرك طوله 300 cm في ثلاث قطع (كل منها بين عقدتين) عندما يكون التردد الحافز 20.0 Hz . ما هي سرعة انتشار الموجة في الزنبرك ؟

استدلال منطقي :

سؤال : كيف يمكن استنتاج سرعة الموجة من وصف الموجة ؟

الإجابة : العلاقة $v = f\lambda$ صحيحة هنا كما هي صحيحة لجميع الموجات ، كما أننا نعلم أن تردد الموجة هو نفس التردد الحافز .

سؤال : ما هو الطول الموجي في حالتنا هذه ؟

الإجابة : اهتزاز الزنبرك في ثلاث قطع يعني أن طول الزنبرك يساوي ثلاثة أمثال نصف الطول الموجي .

الحل والمناقشة : يمكن حساب الطول الموجي من العلاقة $L = 3(\lambda/2)$. إذن :

$$\lambda = \frac{2L}{3} = \frac{600\ \text{cm}}{3} = 200\ \text{cm} = 2.00\ \text{m}$$

وعليه ، بوضع $f = 20.0\ \text{Hz} = 20.0\ \text{s}^{-1}$ نجد أن :

$$v = f\lambda = (20.0\ \text{s}^{-1})(2.00\ \text{m}) = 40.0\ \text{m/s}$$

كان بإمكاننا طبعًا الحصول على نفس النتيجة بالتعويض عن $n = 3$ ببساطة في العلاقة السابق استنتاجها . ومع ذلك فإن معظم الفيزيائيين لا يفضلون حفظ معادلات مختلفة للمواقف المختلفة . ذلك أنهم يستخدمون عادة عدد أنصاف الطول الموجي على الزنبرك كله لإيجاد λ ثم العلاقة $f = v/\lambda$ لإيجاد المجهول . وفي الحقيقة فإن الأغلبية العظمى من مواقف الرنين التي سنتعامل معها يمكن وصفها باستخدام هذه العلاقة وتحليل النظام الرنيني ؛ وعليه فلن يكون من الضروري علينا أن نحفظ معادلة لكل حالة على حدة .

تمرين : ما هي السرعة الموجية عندما تهتز الموجة بنفس التردد ولكن في خمس قطع ؟

الإجابة : 24.0 m/s .

أهداف التعلم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف أو شرح (أ) سعة ودورة وتردد الاهتزاز ، (ب) الهرتز ، (جـ) ثابت الزنبرك ، (د) الحركة التوافقية البسيطة ، (هـ) الحركة الجيبية ، (و) المضاءلة (أو التخميد) ، (ز) الرنين ، (ح) الموجة الجيبية ، (ط) الطول الموجى ، (ى) قمة الموجة وقاع الموجة ، (ك) سعة ودورة وتردد الموجة ، (ل) العقدة والبطن ، (م) الموجة المستقرة ، (ن) الرنين الموجى ، (س) العلاقة بين طول القطعة و λ ، (ع) الموجة المستعرضة ، (ف) الموجة الطولية ، (ص) التوافقية .

2 ـ استخدام اعتبارات الطاقة لإيجاد سرعة متذبذب يتحرك حركة توافقية بسيطة فى أى نقطة على مساره . ذكر الوضع المناظر لكل من السرعة العظمى والصغرى .

3 ـ استخدام قانون نيوتن الثانى لإيجاد عجلة متذبذب يتحرك حركة توافقية بسيطة عند أى نقطة فى مساره . ذكر الوضع المناظر لكل من العجلة العظمى والصغرى .

4 ـ شرح كيف يمكن التحقق مما إذا كانت حركة معينة هى حركة توافقية بسيطة أم لا ، وما علاقة طريقة اختبار ذلك بقانون هوك .

5 ـ شرح كيف تعطينا الحركة على دائرة إسناد وصفًا للحركة التوافقية البسيطة .

6 ـ إيجاد التردد الطبيعى لاهتزاز (أ) نظام الزنبرك والكتلة ، (ب) البندول إذا أعطيت البيانات الكافية .

7 ـ شرح لماذا تسمى الحركة التوافقية البسيطة حركة جيبية . كتابة معادلة الحركة الجيبية وشرح الكميات المستخدمة فيها .

8 ـ توضيح من أين تنشأ قوة الاستعادة فى حالة البندول البسيط وشرح لماذا تعتبر هذه الحركة حركة توافقية بسيطة بالتقريب فقط . كتابة معادلة دورة الحركة .

9 ـ رسم عدد من أشكال الموجة المستقرة فى حالة زنبرك مثبت من طرفيه . استخدام الشكل الموجى للموجة المستقرة لحساب v أو f بمعلومية طول الوتر وأى من f أو v .

10 ـ رسم الشكل الموجى لموجة طولية مستقرة فى حالة رنين زنبرك مثبت من طرفيه .

ملخص

الوحدات المشتقة والثوابت الفيزيائية :

وحدة التردد :

$$1 \text{ hertz (Hz)} = 1 \text{ cycle/second} = 1 \text{ s}^{-1}$$

تعريفات ومبادئ أساسية :

التردد (f)

التردد f هو عدد دورات الاهتزاز التى تحدث فى وحدة الزمن . وإذا كان الزمن مقيسًا بالثوانى تكون وحدة f هى Hz .

الدورة (T)

الدورة T هى الزمن الذى يستغرقه النظام المهتز فى عمل دورة كاملة واحدة . والدورة تساوى مقلوب التردد : $T = 1/f$.

سعة الحركة الدورية

السعة هى أقصى إزاحة للنظام عن موضع اتزانه .

الحركة التوافقية البسيطة (SHM)

تحدث الحركة التوافقية البسيطة عندما يتحرك النظام استجابة لقوة استعادة تتناسب خطيًا مع مقدار إزاحة النظام عن موضع الاتزان : $F = -kx$.

تردد الاهتزاز في SHM

تردد الاهتزاز في SHM هو :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

حيث k ثابت القوة التي تميل إلى إعادة النظام إلى موضع اتزانه ، m كتلة الجسم المهتز .

الصورة الرياضية للحركة التوافقية البسيطة : الحركة الجيبية

يعتمد موضع الجسم المتحرك SHM على الزمن طبقًا للمعادلة :

$$x = x_0 \cos(\omega t) = x_0 \cos(2\pi f t) = x_0 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

حيث x_0 هي السعة ، f التردد (مقاسًا بالهرتز Hz) ، ω السرعة الزاوية (مقاسة بالوحدات rad/s) ، T الدورة (مقاسة بالثانية s) . معادلتا السرعة والعجلة كدالة في الزمن هما :

$$v = -(2\pi f x_0) \sin(2\pi f t)$$

$$a = -(2\pi f)^2 x_0 \cos(2\pi f t)$$

خلاصة :

1 ـ لاحظ أن $2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ، حيث k ثابت القوة للنظام ، m كتلة الجسم المهتز .

2 ـ عند أية لحظة زمنية t تسمى الكمية $\omega t = 2\pi f t = 2\pi t/T$ بطور الحركة ، وهي تعرفنا في أي جزء من الدورة يوجد النظام في تلك اللحظة . الطور يقاس بالزوايا نصف القطرية . تتكون الدورة الواحدة من 2π rad .

3 ـ العلاقات السابقة تنطبق على نظام تم تحريره من موضع السعة عند $t = 0$.

البندول البسيط

عندما تكون زاوية التأرجح صغيرة يتحرك البندول البسيط SHM يعطى ترددها بالعلاقة :

$$f = \frac{1}{2\pi} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

خلاصة :

1 ـ هذه العلاقة تكون صحيحة لثلاثة أرقام معنوية على الأقل للزوايا التي تقل عن 10° تقريبًا .

المصطلحات الفنية للموجات

السرعة الموجية v هي السرعة التي تنتقل بها نبضة موجية في الوسط الحامل للموجة . الطول الموجي λ هو المسافة بين نقطتين على الموجة لهما نفس الطور .

العلاقة الآتية صحيحة لجميع الموجات :

$$v = f\lambda$$

حيث f تردد الاهتزاز .

خلاصة :

1 ـ تتعين السرعة الموجية بخواص الوسط ، ويتعين التردد بتردد مصدر الموجة . وهاتان الكميتان تحددان بالتالي الطول الموجي .

2 ـ السرعة الموجية في حالة الموجات على وتر تعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\text{الشد}}{\text{الكتلة لوحدة الطول}}} \tag{18-14}$$

انعكاس الموجات

تنعكس الموجة عند الطرف الثابت للوسط الحامل لها مقلوبة بالنسبة للموجة الأصلية . تنعكس الموجة عند الطرف الحر للوسط معتدلة .

خلاصة :

1 ـ الموجة المنعكسة تماثل الموجة الساقطة تمامًا بعد أن يتغير طورها بمقدار نصف دورة (π rad) .

مبدأ التراكب

إذا وقعت نقطة تحت تأثير موجتين أو أكثر في نفس الوقت فإن إزاحتها المحصلة تساوى المجموع الاتجاهى لإزاحات الموجات المنفردة .

الموجات المستقرة على وتر

في حالة الوتر المثبت من طرفيه تحدث الموجات المستقرة (الرنينية) عندما يساوى طول الوتر عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجي :

$$L = n\,\frac{\lambda_n}{2}$$

خلاصة :

1 ـ حيث أن السرعة الموجية واحدة لجميع الترددات في نفس الوسط ، تعطى الترددات الرنينية بالعلاقة :

$$f_n = v/\lambda_n = n\,\frac{v}{2L}$$

2 ـ الترددات الرنينية مثال ماكروئى لتكممة كمية فيزيائية ، بمعنى أن f لا يمكنه أن يأخذ جميع القيم بلا ضابط ، بل يمكنه أن يأخذ قيمًا محددة فقط تساوى مضاعفات صحيحة لكمية أساسية معينة . والتردد الأساسى في هذه الحالة هو $f_1 = v/2L$.

الموجات المستعرضة والطولية

الموجات المستعرضة هي تلك الموجات التي يتحرك فيها الوسط في اتجاه عمودى على اتجاه انتشار الموجة .

الموجات الطولية هي تلك الموجات التي يتحرك فيها الوسط في نفس اتجاه انتشار الموجة .

أسئلة وتخمينات

1 ـ ارسم رسمًا بيانيًا تخطيطيًا يمثل تغير كل من (أ) طاقة حركة كرة بندول ، (ب) طاقة وضعها ، (جـ) طاقتها الكلية مع الموضع ممثلا على نفس المحور الأفقي .

2 ـ ارسم رسمًا بيانيًا تخطيطيًا يمثل تغير كل من (أ) سرعة حركة الكتلة في نظام الزنبرك والكتلة ، (ب) عجلتها مع الموضع ممثلاً على نفس المحور الأفقي .

3 ـ علقت كتلتان متساويتان في الوزن معًا في طرف نفس الزنبرك ، ثم وضع النظام في حالة اهتزاز . ماذا يحدث لسعة الحركة الاهتزازية لطرف الزنبرك وترددها وسرعتها القصوى إذا وقعت إحدى الكتلتين (أ) عندما كان امتداد الزنبرك في نهايته العظمى ؟ (ب) عند مرور الكتلة بموضع الاتزان ؟

4 ـ تقول طالبة مبكرة النضج عقليا إنها تستطيع التنبؤ بتردد نظام الزنبرك والكتلة حتى إذا لم تعلم ثابت الزنبرك أو الكتلة ، وتقول إن كل ما تحتاج أن تعرفه هو مقدار امتداد الزنبرك عند تعليق كتلة في طرفه . هل تراهن بنقودك أنها لن تستطيع ذلك ؟

5 ـ كيف تتغير دورة بندول ما عند وجود هذا البندول في مصعد متسارع ؟ ادرس حالتي التسارع إلى أعلى وإلى أسفل .

6 ـ كيف يمكن حساب التردد الرنيني لسيارة إلى أعلى وإلى أسفل بمعلومية مقدار انخفاض السيارة عند زيادة الحمل بها ؟ قدر قيمة هذا التردد في حالة أوتوموبيل . متى يمكن أن يكون ذلك هامًا ؟

7 ـ تهتز غسالة الملابس الأوتوماتيكية أحيانًا بشدة أثناء دورة التجفيف . لماذا ؟ هل عدم اتزان الحمل هو كل القصة ؟ ماذا يجب أن يفعل مصمم الغسالة لتقليل هذه المشكلة إلى الحد الأدنى ؟

8 ـ قيمة g على القمر سدس قيمتها على الأرض . كيف يتغير تردد اهتزاز كل من الأنظمة الآتية إذا نقل من الأرض إلى القمر : (أ) نظام زنبرك وكتلة أفقي ؟ ، (ب) نظام زنبرك وكتلة رأسي ؟ ، (جـ) بندول بسيط ؟ كيف يكون سلوك كل نظام في سفينة فضاء تدور حول الأرض ؟

9 ـ تتحرك النبضتان الموجيتان المثاليتان الموضحتان بالشكل م 1-14 على وتر بسرعة قدرها 20 m/s . بين بالرسم شكل الوتر بعد مرور 0.40 s . كرر ذلك بعد مرور 0.20 s .

شكل م 1-14

10 ـ هل يمكن أن تؤدي موجتان متماثلتان تتحركان في نفس الاتجاه على وتر واحد إلى تكوين موجة مستقرة ؟

11 ـ إذا راقبت أشخاصًا يحاولون حمل حوض ملئ بالماء ستلاحظ أن بعضهم يفعل ذلك بنجاح كبير ، ولكن يلاحظ مع آخرين أن الماء يهتز بشدة في الإناء بالرغم من حرصهم الشديد . ما السبب في ذلك ؟

مسائل

القسمان 1-14 و 2-14

1 ـ علقت كتلة في طرف زنبرك رأسي فوجد أنها ترتفع بمقدار 45 cm عن الأرضية في حالة الاتزان . وعندما شدت الكتلة إلى أسفل مسافة قدرها 9.6 cm ثم تركت حرة ، لوحظ أنها تصل إلى أكثر النقط انخفاضًا في مسارها 19 مرة في أول 97.3 s بعد تحريرها . ما قيمة (أ) تردد الحركة ؟ (ب) دورة الحركة ؟ (جـ) سعة الحركة ؟

2 ـ أزيح بندول جانبًا بزاوية صغيرة بالنسبة للموضع الرأسي ثم ترك حرًا ، فتأرجح البندول بين نقطتين تفصلهما مسافة قدرها 8.75 cm . ويستغرق هذا البندول زمنًا قدره 268 s للوصول إلى نقطة بداية الحركة للمرة الستين بعد تحريره . ما قيمة كل من (أ) تردد الحركة ؟ (ب) دورة الحركة ؟ (ب) سعة الحركة ؟

3 ـ يتمدد زنبرك معين يتبع قانون هوك بمقدار 42 cm عند تعليق حمل قدره 0.28 N في طرفه . ما مقدار طاقة الجهد المختزنة في الزنبرك عند انضغاطه بمقدار 3.35 cm ؟

4 ـ يتبع زنبرك بندقية الأطفال الهوائية قانون هوك ، ويتطلب قوة قدرها 300 N لضغطه مسافة قدرها 12.5 cm عند موضع التعمير . ما مقدار طاقة الجهد المختزنة في الزنبرك عند موضع التعمير ؟

5 - ثبتت كتلة قدرها 250 g فى طرف زنبرك معين ثابت الزنبرك له $k = 120$ N/m ثم أطيل الزنبرك بمقدار 5.0 cm من موضع الاتزان وترك حرًا . أوجد (أ) سرعة الكتلة عند مرورها بموضع الاتزان ، (ب) عجلة الكتلة بعد تحريرها مباشرة .

6 - ينزلق نظام مكون من زنبرك مهمل الوزن وكتلة قدرها 75 g على سطح أفقى لا احتكاكى . سلطت قوة أفقية قدرها 0.66 N على الزنبرك فسببت امتداده بمقدار 7.8 cm . أوجد (أ) سرعة الكتلة عند مرورها بموضع الاتزان ، (ب) عجلتها لحظة تحريرها .

7 - إذا كان ثابت الزنبرك بالنسبة لزنبرك فى بندقية أطفال هوائية 1650 N/m وكان الزنبرك منضغطًا مسافة قدرها 9.0 cm فى حالة التعمير ، فما أقصى سرعة تنطلق بها طلقة كتلتها 22 g من البندقية ؟

القسمان 3-14 و 4-14

8 - تتذبذب كتلة مقدارها 3.5 kg فى حركة توافقية بسيطة فى طرف زنبرك . فإذا كانت سعة الحركة 40 cm وثابت الزنبرك 150 N/m ، أوجد سرعة وعجلة الكتلة عندما تكون إزاحتها (أ) 40 cm ، (ب) 0 cm ، (جـ) 20 cm .

9 - استخدمت كتلة مقدارها 450 g فى نظام الزنبرك والكتلة فوجد أن سرعتها القصوى 21 cm/s أثناء اهتزازها بسعة قدرها 4.2 cm . أوجد (أ) ثابت الزنبرك ، (ب) أقصى عجلة للكتلة ، (جـ) سرعة وعجلة الكتلة عندما تكون على بعد 3.0 cm من موضع الاتزان .

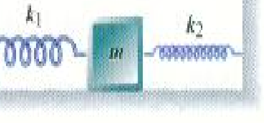
■ 10 - رسمت دائرة نصف قطرها 26 cm فى مركز ملعب لكرة القدم وقامت فتاة بالعدو على محيط الدائرة بسرعة ثابتة المقدار قيمتها 3.75 m/s . وفى نفس الوقت قام فتى بالجرى غدوًا ورواحًا على الخط الجانبى للملعب بحيث تتساوى سرعته دائمًا مع سرعة الفتاة فى ذلك الاتجاه . أوجد (أ) تردد حركة الفتى ، (ب) عجلة الفتى عند نقطتى نهاية حركته ، (جـ) أقصى سرعة للفتى .

■ 11 - يدور قمر صناعى حول الأرض بسرعة مقدارها 3100 m/s فى مدار يمر بالقطبين الشمالى والجنوبى ونصف قطره 4.2×10^7 m . اعتبر نقطة تتحرك على استقامة المحور الشمالى الجنوبى للأرض ويمر بمركزها بحيث تتساوى سرعتها دائمًا مع مركبة سرعة حركة القمر الصناعى فى الاتجاه الشمالى الجنوبى . أوجد (أ) تردد حركة النقطة ، (ب) عجلة النقطة عند نقطتى نهاية الحركة ، (جـ) سرعتها القصوى .

12 - عند تعليق كتلة قدرها 160 g فى طرف زنبرك وجد أن النظام يهتز بحيث يتم 33 دورة كاملة فى 80.5 s . ما قيمة ثابت الزنبرك ؟

13 - لاحظ طفلان داخل سيارة أنهما يستطيعان هز السيارة إلى أعلى وإلى أسفل بمقدار 12 دورة فى زمن قدره 19.5 s . (أ) أوجد ثابت الزنبرك لنظام تعليق السيارة بفرض أن كتلتها 1450 kg . (ب) إذا كانت الكتلة الكلية للطفلين 45 kg ، فبأى قدر يرتفع مستوى السيارة عندما يخرج الطفلان منها ؟

■ 14 - يستقر قالب كتلته 0.85 kg على سطح أفقى لا احتكاكى ويتصل بحائطين عن طريق زنبركين ثابتاهما k_1 و k_2 ، وهذا مبين بالشكل م 2-14 . فإذا كان $k_1 = 44$ N/m ، $k_2 = 34$ N/m ، فبأى تردد يهتز القالب بعد إزاحته قليلاً عن موضع الاتزان ثم تركه حرًا .



شكل م 2-14

■ 15 - علقت كتلة مقدارها m فى طرف سلك طوله L ومساحة مقطعه A ومعامل يونج له Y . أثبت أن الكتلة يمكن أن تهتز إلى أعلى وإلى أسفل بتردد قدره $f = (1/2\pi)\sqrt{AY/Lm}$.

القسم 5-14

■ 16 - تهتز كتلة مثبتة فى طرف زنبرك ذهابًا وإيابًا بحيث تعطى إزاحتها فى أى لحظة بالمعادلة $x = 18 \sin(3.7t)$ cm . أوجد (أ) سعة الحركة ، (ب) تردد الحركة ، (جـ) دورة الحركة ، (د) وإذا كانت الكتلة تساوى 520 g ، فما قيمة ثابت الزنبرك ؟

■ 17 ـ تهتز كتلة قدرها 165 g مثبتة فى طرف زنبرك إلى أعلى وإلى أسفل طبقًا للمعادلة $y = 9.4 \sin (6.8t)$ cm . أوجد (أ) ثابت الزنبرك ، (ب) سعة الحركة ، تردد الحركة ، (د) دورة الحركة .

18 ـ اكتب الوصف الرياضى لوضع الكتلة فى المسألة 5 كدالة فى الزمن ، أى اكتب العلاقة $x(t)$ ، استخدم الوحدات SI .

■ 19 ـ شدت كتلة مقدارها 0.88 kg مثبتة فى طرف زنبرك مسافة قدرها 2.95 cm من موضع الاتزان فى الاتجاه الموجب للمحور x ثم حررت من السكون ، فإن علمت أن ثابت الزنبرك المستخدم $k = 40$ N/m ، (أ) اكتب معادلة الموضع كدالة فى الزمن $x(t)$ والسرعة كدالة فى الزمن $v(t)$. (ب) أوجد قيمة كل من x و v عند اللحظات $t = 0.5$ s, 1.0 s, 2.0 s . (جـ) أوجد قيمة t عندما تصل الكتلة إلى نقطة بداية الحركة لثالث مرة بعد تحريرها . (جـ) أوجد الزمن اللازم لوصول الكتلة إلى الموضع $x = -1.50$ cm لأول مرة .

القسم 6-14

20 ـ ما طول بندول زمنه الدورى 2.0 s (أ) على الأرض ؟ ، (ب) على القمر ؟ وزن أى جسم على القمر يساوى سدس وزنه على الأرض .

21 ـ بندولان تردد أحدهما ثلاثة أمثال تردد الآخر ، أى $f_1 = 3f_2$. ما هى النسبة بين طوليهما ، L_1/L_2 .

■ 22 ـ أزيح بندول جانبًا بزاوية معينة ثم ترك حرًا ، وعندما مرت الكرة بأسفل نقطة فى قوس مسارها كان الشد فى الخيط ضعف وزن الكرة . إثبت أن زاوية الإزاحة الأصلية $60°$.

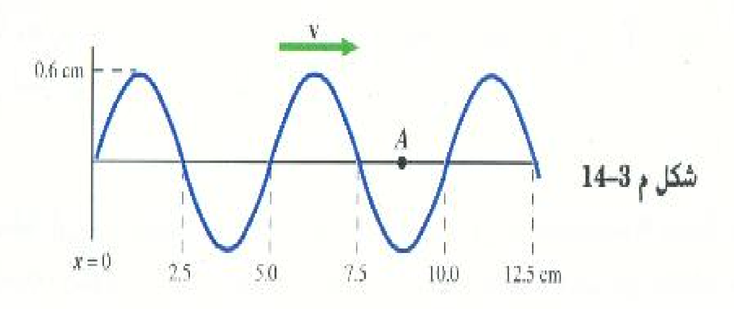
23 ـ يصنع بندول طوله 99.2 cm عددًا قدره 499.0 من الذبذبات فى زمن قدره 1000 s عند مستوى سطح البحر بالقطب الشمالى ، ويصنع نفس البندول 500.5 ذبذبة خلال 1000 s عندما يوجد على مستوى سطح البحر عند خط الاستواء . احسب قيمتى g عند القطب الشمالى وعند خط الاستواء .

24 ـ تصادف أن وجدت نفسك على كوكب حليف وأردت ، من بين أشياء أخرى ، أن تعلم شدة الجاذبية عل هذا الكوكب . ولأنك طالب فيزياء ذكى قررت استخدام بندول بسيط طوله 1.0 m فوجدت أن كل 100 ذبذبة تستغرق 178 s . فإذا كان وزنك على الأرض 635 N ، فما هو وزنك على هذا الكوكب ؟

■ 25 ـ زنبرك خفيف طوله الطبيعى 30.5 cm . علقت كتلة قدرها 300 g فى الزنبرك ثم استعمل هذا الزنبرك الممتد بالكتلة المعلقة فيه كبندول بسيط صغير السعة ، فوجد أن دورة هذا البندول 1.45 s . بفرض أن $g = 9.80$ m/s² ، أوجد ثابت الزنبرك المستخدم .

الأقسام من 8-14 إلى 10-14

26 ـ تتحرك الموجة الموضحة بالشكل م 3-14 على وتر إلى اليمين بسرعة مقدارها 25 cm/s . أوجد (أ) الطول الموجى لهذه الموجة ، (ب) سعتها ، (جـ) ترددها ، (د) دورتها .



شكل م 3-14

27 ـ عندما تمر الموجة بالنقطة A في الشكل م 14-3 يهتز الوتر تبعًا للعلاقة $y = y_0 \sin (2\pi ft)$. ما قيمة كل من y_0 و f إذا كانت سرعة الموجة 38 cm/s ؟

28 ـ تنتقل كل موجات الراديو (الموجات اللاسلكية) في الهواء بسرعة مقدارها 3×10^8 m/s . ما قيمة الطول الموجي لموجة نموذجية تبثها محطة إرسال بتردد قدره 1450 Hz ؟

29 ـ تتحرك موجات الضوء في الهواء بسرعة مقدارها 3×10^8 m/s . فإذا كان الطول الموجي للضوء الأخضر حوالى 520 nm ، فما تردد هذه الموجات ؟

30 ـ ارجع إلى الشكل م 14-1 وارسم شكلاً يمثل الموقف بعد 2.2 s .

31 ـ ما هو الزمن اللازم لكي تعود كل من النبضتين الموضحتين بالشكل م 14-1 إلى نفس موضعها ؟

32 ـ ما مقدار الكتلة اللازم تعليقها في طرف خيط طوله 175 cm حتى تكون سرعة الموجات المستعرضة على الخيط 46.5 m/s ؟ كتلة كل 5 m من الخيط تساوي 0.855 g .

33 ـ حبل مشدود بين قائمتين المسافة بينهما 34 m ، وكتلة المتر الطولي منه 55 g . أعطي الحبل نبضة مستعرضة عند منتصفه فاستغرقت زمنًا قدره 0.37 s في الوصول إلى كل من طرفيه . ما مقدار الشد في الحبل .

34 ـ استخدم مهتز تردده 180 Hz في تكوين نسق موجي مستقر مكون من ثلاث قطع على وتر مشدود طوله 2.20 m . (أ) ما هو الطول الموجي للموجات ؟ (ب) ما هي سرعة هذه الموجات ؟

35 ـ إذا كانت كتلة وحدة الطول من الوتر المذكور بالمسألة 34 تساوي 1.70 g/m ، فما هو الشد اللازم في الوتر لكي نحصل على النسق الموجي السابق وصفه ؟

■ 36 ـ ما قيمة الشد اللازم لتكوين نسق موجي مكون من 4 عروات على الوتر المذكور بالمسألتين 34 و 35 ؟

■ 37 ـ لوحظ أن سلكًا مشدودًا بين قائمين يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قدرها 12.5 m يهتز تحت تأثير الريح مع تكون عقدة بالمنتصف (توجد بالطبع عقدتان أيضًا عند طرفي السلك) . وكان تردد الصوت الناتج عن السلك المهتز بهذا الشكل 43 Hz . فإذا علمت أن الكثافة الطولية للسلك 4.5 g/m ، فما مقدار الشد في السلك ؟

38 ـ يرن وتر معين مثبت من طرفيه بتردد أساسي قدره 256 Hz . ما هي الترددات الرنينية الأعلى الثلاثة التالية ؟

39 ـ يرن وتر معين في ثلاث قطع بتردد قدره 145 Hz . اكتب قيمة أربعة ترددات رنينية أخرى لهذا الوتر .

■ 40 ـ وتر أحد تردداته الرنينية 760 Hz وتردده الرنيني الأعلى التالي 950 Hz . ما هو التردد الرنيني الأساسي للوتر ؟

■ 41 ـ تغير عازفة الكمان طبقة الصوت الصادر من وتر بتحريك إصبعها على الوتر ، مغيرة بذلك موضع إحدى العقد الطرفية للوتر . (أ) إذا كان التردد الأساسي للوتر الحر 440 Hz ، فما هو التردد الأساسي الناتج عندما تضع العازفة إصبعها على بعد قدره خمس طول الوتر من طرفه العلوي ؟ (ب) أين يجب أن تضع العازفة إصبعها ليصبح التردد الأساسي 1100 Hz ؟

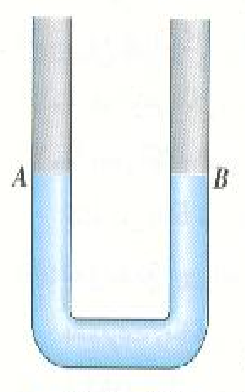
42 ـ وضع زنبرك ممتد إلى طول قدره 3.60 m في حالة اهتزاز طولي باستخدام مذبذب عند أحد طرفيه . وعندما كان التردد الحافز 4.5 Hz اهتز الزنبرك اهتزازًا رنينيًا بحيث تكونت عليه خمس عقد (بما فيها عقدتين عند الطرفين) . ما هي سرعة الموجات الطولية ؟

■ 43 ـ وصل مهتز مستعرض صغير إلى أحد طرفي وتر أفقي كثافته الطولية 0.65 g/m ويتحرك بسعة صغيرة بدرجة كافية لاعتبار هذا الطرف عقدة للأنساق الموجية المستقرة . ويمر الوتر على بكرة تبعد 1.80 m عن المهتز . فإذا علقت في الطرف الحر للوتر بعد مروره على البكرة كتل مختلفة ، فما هي الكتلة اللازمة للحصول على رنين يقسم الوتر إلى (أ) أربع عروات ؟ (ب) خمس عروات ؟ (جـ) ست عروات ؟

مسائل عامة

■ 44 ـ يتحرك كباس رأسي حركة توافقية بسيطة سعتها 21.5 cm وترددها f ، ويحمل الكباس حلقة معدنية حرة على سطحه العلوى . وعند الترددات المنخفضة للكباس تتحرك الحلقة المعدنية معه إلى أعلى وإلى أسفل . ولكن عند الترددات العالية جدًا يلاحظ أن الحلقة المعدنية تطفو لحظيًا فوق الكباس عندما يبدأ الحركة إلى أسفل . (أ) ما هى العجلة القصوى للكباس عندما تبدأ الحلقة المعدنية فى الانفصال عنه ؟ (ب) ما هو أقل تردد يحدث عنده هذا الانفصال ؟

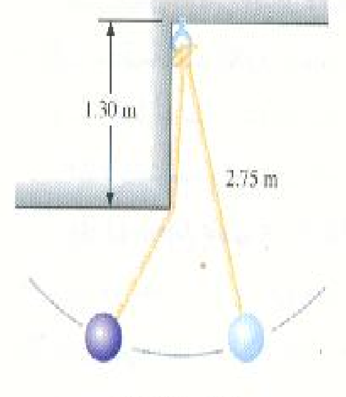
■ 45 ـ ثبتت كتلة فى طرف زنبرك منضغط ثم غمرت المجموعة فى إناء من الماء درجة حرارته 9.500°C . وبعد تحرير الزنبرك بدأت الكتلة فى الاهتزاز ذهابًا وإيابًا بسعة متناقصة نتيجة لقوى الاحتكاك (اللزوجة) . وعندما توقف النظام نهائيًا عن الاهتزاز . أصبحت درجة الحرارة 19.625°C . فإذا كان الزنبرك والكتلة والوعاء والماء مجتمعة تكافئ من الناحية الحرارية كمية من الماء كتلتها 95 g ، (أ) ما مقدار الطاقة التى كانت مختزنة فى الزنبرك ؟ (ب) إذا كان الزنبرك منضغطاً فى البداية بمقدار 5.8 cm ، فما هو ثابت الزنبرك المستخدم ؟



شكل م 4–14

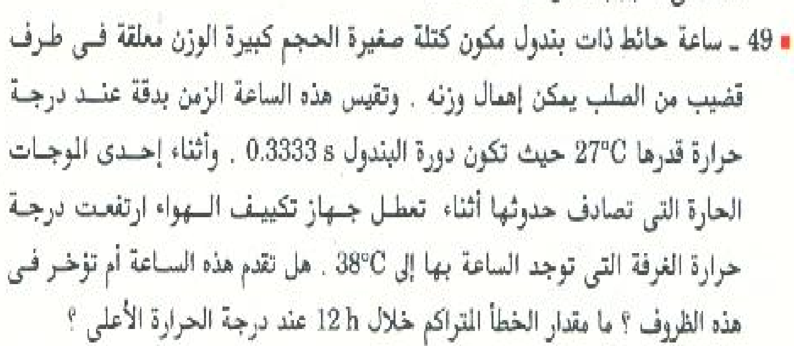
■■ 46 ـ وضعت كمية من سائل غير لزج فى أنبوبة مفتوحة الطرفين على شكل الحرف U ، وكانت المسافة الكلية من A إلى B هى L (شكل م 4–14) . نفخ شخص نفخة سريعة فى الطرف A فبدأ السائل فى التذبذب . إثبت أن السائل يتحرك حركة توافقية بسيطة ترددها $(1/\pi)\sqrt{g/2L}$.

■■ 47 ـ أوجد تردد البندول الموضح بالشكل م 5–14 فى حالة الذبذبات الصغيرة .



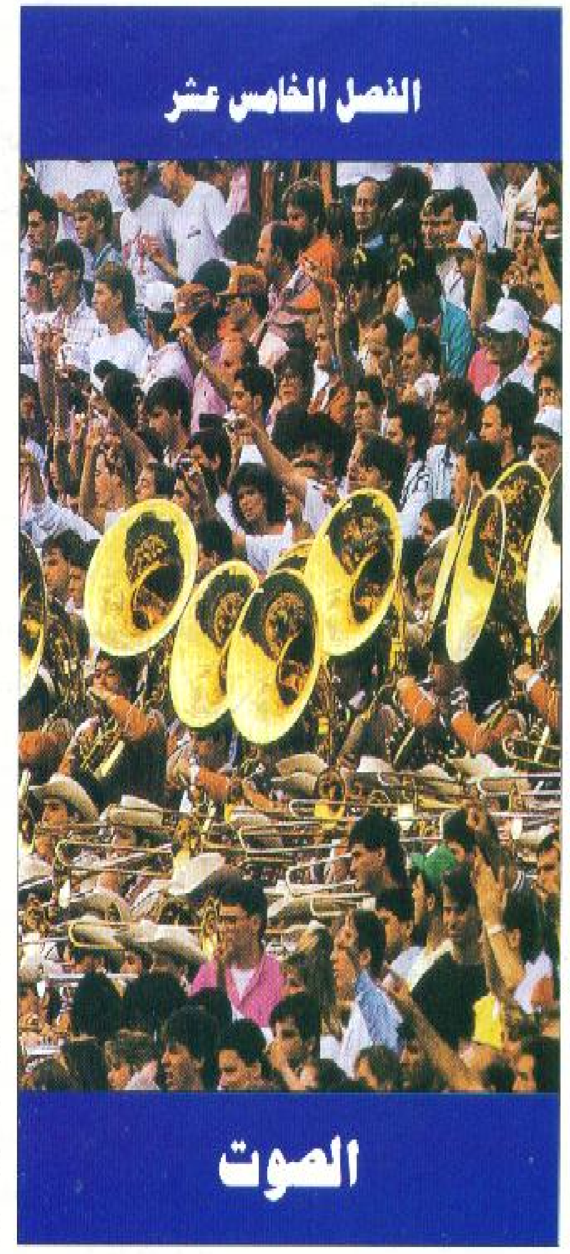
شكل م 5–14

■■ 48 ـ سلكان متساويان فى مساحة المقطع ومشدودان بين نفس القائمتين ، أحدهما مصنوع من الصلب والآخر من الألمنيوم . وكان الشد T_1 فى السلك المصنوع من الصلب بحيث يتحقق رنينه بالتردد الأساسى للاهتزازات المستعرضة . ماذا يجب أن تكون قيمة الشد فى السلك المصنوع من الألمنيوم اللازم لرنينه، بدلالة T_1 ، (أ) بالتردد الأساسى ؟ (ب) بالتوافقية الثالثة ؟



■ 49 ـ ساعة حائط ذات بندول مكون كتلة صغيرة الحجم كبيرة الوزن معلقة فى طرف قضيب من الصلب يمكن إهمال وزنه . وتقيس هذه الساعة الزمن بدقة عند درجة حرارة قدرها 27°C حيث تكون دورة البندول 0.3333 s . وأثناء إحدى الموجات الحارة التى تصادف حدوثها أثناء تعطل جهاز تكييف الهواء ارتفعت درجة حرارة الغرفة التى توجد الساعة بها إلى 38°C . هل تقدم هذه الساعة أم تؤخر فى هذه الظروف ؟ ما مقدار الخطأ المتراكم خلال 12 h عند درجة الحرارة الأعلى ؟

■■ 50 ـ طوف خشبى مسطح وزنه النوعى 0.85 يطفو على سطح الماء العذب . وعندما وقف رجل كتلته 90 kg على هذا الطوف نتج عن ذلك هبوطه فى الماء بحيث أصبح سطحه العلوى فى مستوى الماء . (أ) اثبت أن قوة الطفو الإضافية المؤثرة على القالب تتبع قانون هوك . (ب) أوجد ثابت الزنبرك لهذا النظام وتردد الاهتزاز الرأسى للطوف عندما يقفز الرجل من فوقه . افترض أن التأثيرات المخمدة الناشئة عن اللزوجة يمكن إهمالها .



سوف نقوم الآن بتطبيق مفاهيم الحركة الموجية التي ناقشناها في الفصل السابق على نوع معين من الحركة الموجية وهو الصوت . وليست دراسة الصوت مهمة في حد ذاتها فقط ، بل إنها علاوة على ذلك تزودنا بوسيلة قيمة جدًا لإثراء وتقوية معلوماتنا عن الحركة الموجية عمومًا . وسوف نجد أن كثيرًا من المبادئ والأفكار التي سنتناولها هنا بالمناقشة فيما يتعلق بالصوت لها أهمية كبيرة أيضًا في دراستنا للضوء ولأنواع أخرى من الحركة الموجية .

15-1 منشأ الصوت

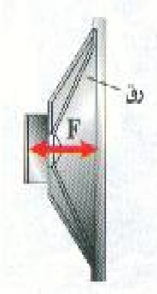
الموجات الصوتية هي موجات طولية تنتقل في أي مادة تقريبًا ، سواء كانت هذه المادة صلبة أم سائلة أم غازية . وتنشأ هذه الموجات بواسطة أي آلية لتوليد الموجات التضاغطية في الوسط المحيط . ومن أمثلة المصادر الصوتية يمكننا أن نذكر وتر الجيتار المهتز والأحبال الصوتية المهتزة والغاز المنفجر في مفرقعة نارية . والصوت لا ينتقل في الفراغ لعدم وجود المادة التي يمكنها نقل التضاغطات الموجية . والتجربة الشهيرة لإثبات ذلك هي أننا لا نسمع صوت جرس يرن داخل غرفة مفرغة من الهواء ؛ فبالرغم من أن الجرس يهتز ، فليس هناك مادة محيطة به يمكنها أن تحمل الاهتزاز إلى آذاننا .

إن اهتمامنا ينصب أساسًا على انتشار الموجات الصوتية في الهواء لأن هذا هو أساس حاسة السمع لدينا . ومع ذلك فإن الصوت ينتقل بسرعة أكبر وفقد أقل للطاقة في

السوائل والجوامد منه فى الهواء . وهذا هو السبب فى أننا إذا وضعنا أذننا على قضيب السكة الحديد يمكننا بهذه الطريقة سماع صوت اقتراب القطار قبل أن نسمعه فى الهواء بوقت طويل . وبالرغم من أن الصوت يعرف عادة بأنه تلك الموجات التى نستطيع سماعها بآذاننا ، فإن ترددات الصوت يمكن أن تكون أكبر كثيرًا أو أقل كثيرًا من الترددات التى تحسها الأذن ؛ وسوف نناقش الأذن البشرية كمكشاف صوتى فى أقسام لاحقة بهذا الكتاب .

15-2 الموجات الصوتية فى الهواء

لندرس الآن عمل مجهار (مكبر صوت) يصدر صوتًا بسيطًا . يتركب المجهار البسيط من غشاء مخروطى مصنوع من مادة مرنة ، يسمى الرق ، يمكنه أن يتذبذب ذهابًا وإيابًا تحت تأثير قوة مسلطة **F** ، كما هو مبين بالشكل 1-15 . (سوف نتعرف على كيفية الحصول على هذه القوة عند دراسة القوى المغناطيسية فى الفصل التاسع عشر) .



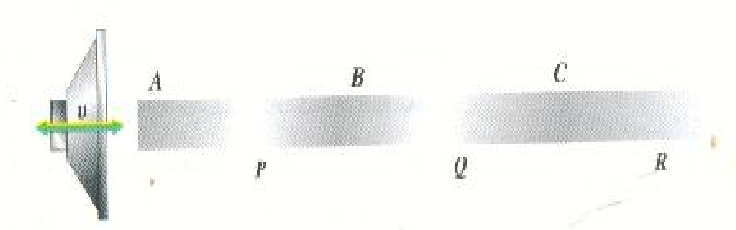
شكل 1-15:
يؤدى اهتزاز الرق المرن للمجهار ذهابًا وإيابًا إلى انبعاث تضاغطات وتخلخلات تنتشر تباعًا فى الهواء .

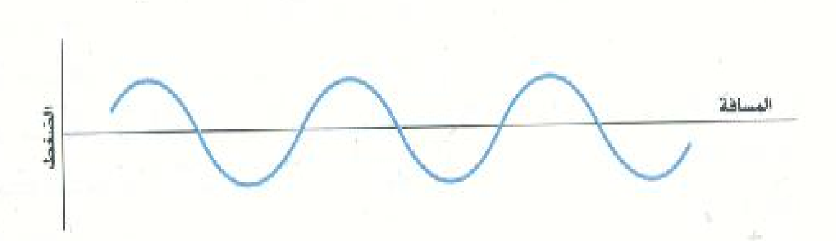
عندما يتحرك الرق بالشكل 1-15 إلى اليمين فإنه يضغط الهواء أمامه ، مكونًا بذلك تضاغطًا ينطلق فى الهواء . وفى لحظة تالية يكون الرق متحركًا إلى اليسار تاركًا أمامه منطقة من الهواء ذات ضغط منخفض تسمى **التخلخل** ، وهذا الاضطراب ينطلق أيضًا بدوره من المجهار وينتشر فى الهواء . وبتكرار هذه العملية مرات كثيرة تنبعث من المجهار سلسلة من الاضطرابات الضغطية ، التضاغطات والتخلخلات ، التى تنتشر متتابعة أحدهما تلو الأخرى فى الهواء . ويتضح من ذلك أن هناك تشابهًا كبيرًا بين هذه الموجات الصوتية والموجات التضاغطية على زنبرك ، والتى ناقشناها تفصيلاً فى الفصل السابق .

ويوضح الشكل 2-15 الموجة المنبعثة من مجهار كالسابق وصفه ، حيث A, B, C تمثل التضاغطات ، بينما تمثل P, Q, R التخلخلات . وبالإضافة إلى ذلك يمثل الشكل 2-15 أيضًا ضغط الهواء بطول هذه الموجة الصوتية فى لحظة معينة ، مع ملاحظة أن الضغط على مستوى الخط الأفقى فى هذا الرسم البيانى هو متوسط الضغط الجوى . ومن الجدير بالذكر أن التضاغطات والتخلخلات فى الموجة الصوتية تسبب تغيرات طفيفة جدًا فى ضغط الهواء ، إذ أن هذه التغيرات لا تزيد عن حوالى 0.01 فى المائة فقط من الضغط الجوى حتى بالنسبة للأصوات العالية جدًا .

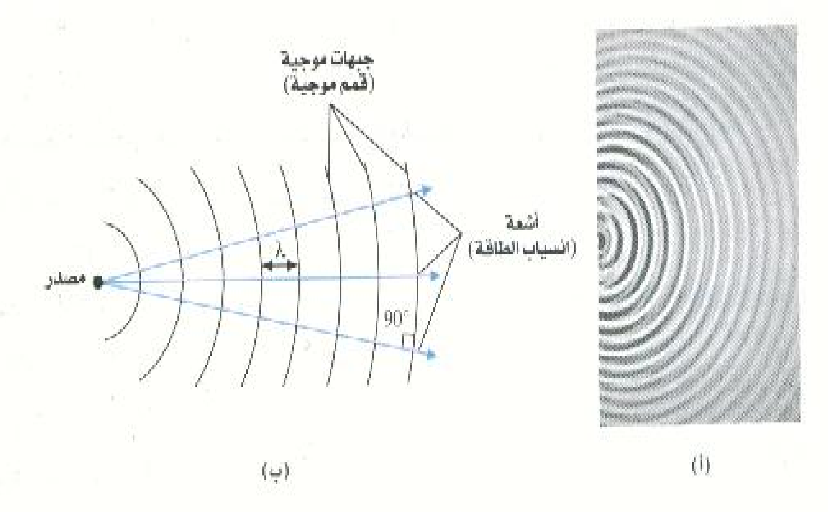
من المشاهد أن الموجات الصوتية المنبعثة من مجهار أو أى مصدر صوتى آخر لا تتقيد عادة بالسير فى خط مستقيم فى اتجاه واحد فقط ، ولكنها بدلاً من ذلك تنتشر من المصدر فى جميع الاتجاهات . ولفهم هذه السمة من سمات الحركة الموجية يمكننا الرجوع إلى الشكل 3-15 أ الذى يمثل موجة ماء منبعثة من مصدر معين ؛ وهذا الموقف موضح تخطيطيًا أيضًا بالشكل 3-15 ب . وكما نرى من هذا الشكل فإن القمم الموجية (وتسمى هنا بالجبهات الموجية) تكون على هيئة دوائر يزداد نصف قطرها زيادة مطردة أثناء حركتها مبتعدة عن المصدر . وعندما تصل القمم الموجية إلى مسافات كبيرة

جدًا بالنسبة إلى المصدر سوف تصبح هذه الدوائر كبيرة جدًا ويكون انحناؤها صغيرًا جـدًا . ومن ثم فإذا نظرنا إلى قمم موجية تقع على بعد كبير جدًا من المصدر فإنـها ستبدو على هيئة خط مستقيم تقريبا أثناء مرورها على سطح الماء . وبناء علـى ذلـك تسـمى الموجـات البعيدة عن مصدرها **بالموجات المستوية** ، وهـو مصطلح موجـى عـام ينطبق أيضًا على الموجات ثلاثية الأبعاد كما سنرى حالا .





شكل 2-15:
تتكون الموجة الصوتية المنبعثة من الجهاز من مناطق ذات ضغط مرتفع وأخرى ذات ضغط منخفض على التوالى . وعمليًا يتغير الضغط فى هذه المناطق بما يعادل 0.01 فى المائة فقط أو أقل .



شكل 3-15:
(أ) مصدر موجى يرسل موجات دائرية على سطح الماء . (ب) رسم تخطيطى يستخدم لتمثيل الموقف الموضح فى (أ) . (مركز تطوير التعليم) .

والموجات المائية الموضحة بالشكل 3-15 تحمل معها الطاقة بعيدًا عن المصدر . وحيث أن الطاقة تنتقل فى اتجاه انتشار الموجة فإن الطاقة التى تحملها تتحرك على استقامة الخطوط نصف القطرية ، كالخطوط المميزة بكلمة **أشعة** فـى الشكـل . **لاحظ أن الأشعة طبقًا للتعريف عمودية على الجبهات الموجية** . وحيـث أن الجبهـات الموجيـة تتحول إلى خطوط مستقيمة تقريبًا على بعد كبير من المصدر ، ولأن الأشعة عمودية على الجبهات الموجية ، **فإن الأشعة تكون متوازيـة عندما تكون بعيدة جدًا عن المصدر الموجى ، أى فى الموجة المستوية** .

والموقف يشبه ذلك إلى حد كبير فى حالة الموجات الصوتية فى الـهواء . ولكن نظرًا لأن هذه حالة ثلاثية الأبعاد ، فإن الجبهات الموجية تكون سطوحًا كروية متمركزة عند المصدر وليست دوائر كما فى الحالة ثنائية البعد . ويتناقص انحناء هذه **الموجات الكرويـة**

تدريجيًا كلما بعدت عن المصدر ، وتتحول إلى أسطح متساوية أساسًا على أبعاد كبيرة جدًا بالنسبة إلى المصدر الموجى ، ولذلك تسمى هذه الموجات أيضًا بالموجات المستوية . وكما فى الحالة السابقة فإن الأشعة تكون عمودية على الجبهات الموجية ، ومن ثم تكون الأشعة متوازية أيضًا مع بعضها البعض فى الموجات المستوية .

ويمكننا أيضًا أن نلاحظ سمة أخرى للموجات الدائرية فى الشكل 3-15 أ (وللموجات الكروية أيضًا) ، وهى أن سعتها تتناقص باستمرار مع زيادة بعدها عن المصدر ، وهذا واضح من درجة التباين بين القمم والقيعان فى الشكل . هذه الظاهرة تعكس حقيقة أن الطاقة التى تحملها الموجة تتوزع على جبهة موجية تزداد كبرًا بزيادة بعدها عن المصدر . وهذه الظاهرة لا تحدث فى حالة انتشار الموجات على الأوتار أو الزنبركات أو القضبان لأن الطاقة كلها تنتشر فى خط مستقيم ، أى فى بعد واحد فقط . ولهذا السبب يمكننا القول أن الأشعة تتفرق من المصدر فى حالة الموجات ثنائية البعد وثلاثية البعد . وبزيادة انفراج الأشعة بزيادة نصف قطر الجبهة الموجية سوف تتوزع الطاقة على خط أو مساحة متزايدة باستمرار . ولكن هذا النقص فى الطاقة لا يحدث فى حالة الموجات المستوية فقط ، وذلك لأن أشعة الموجات المستوية متوازية ومن ثم سوف تنتقل الطاقة فى اتجاه واحد وبالتالى لا تقل مع حركة الموجات .

3-15 سرعة الصوت

تعلمنا فى الفصل الرابع عشر أن سرعة الموجات المستعرضة على وتر مشدود تعطى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{T}{m/L}} \qquad (14\text{–}18)$$

وهذه حالة خاصة من الصور العامة الآتية :

$$v = \sqrt{\frac{\text{قوة الاستعادة}}{\text{عامل القصور الذاتى}}}$$


(أ)


(ب)

تمكننا الطائرات من السفر خلال الهواء بسرعات عالية . والطائرة الموضحة فى (أ) تطير بنفس سرعة الصوت تقريبًا . أما الطائرة الموضحة فى (ب) فيمكنها الطيران بسرعة أعلى من سرعة الصوت .

وبناء على هذا يتوقع أن تتبع سرعة الموجات الطولية فى أى وسط علاقة مشابهة . وهذا صحيح بالفعل ، فقوة الاستعادة فى حالة التضاغطات والتخلخلات مرتبطة بمعامل مرونة الوسط ، كما أن عامل القصور الذاتى هو كثافة الوسط . وفى حالة الوسط أحادى

البعد ، كالسلك أو قضيب السكة الحديد ، يكون معامل المرونة المناسب هو معامل يونج Y ، أما فى حالة الأوساط ثنائية وثلاثية الأبعاد فيجب استخدام معامل المرونـة الحجمية B . وعليه يمكننا كتابة التعبيرين الآتيين لسرعة الصوت :

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad (15\text{-}1)$$

(وللوسط أحادى البعد) ، و :

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \qquad (15\text{-}2)$$

(للأوساط ثنائية وثلاثية الأبعاد) .

لنطبق الآن المعادلة (15-2) على حالة سرعة الصوت فى الغازات .

فى حالة الغازات المثالية تعتمد قيمة B على نوع العملية التـى ينضغـط بـها الغـاز فإذا كان الانضغاط أيسوثرميًا فإن معامل المرونة الحجمية B يسـاوى ضغـط الغـاز P . ولكن التضاغطات الناتجة عن مرور الموجة الصوتية خلال حجم صغير من الغاز تحدث بطريقة فجائية سريعة جدًا بحيث لا تكون هناك فرصة لحدوث أى تبـادل حـرارى . وعليه فإن هذه التضاغطات تكون أدياباتية . وباستعمال قانون الغاز المثالى (المعادلـة 1-10) يمكننا بقليل من العمليات الرياضية البسيطة إثبات أن $B = \gamma P$ فى حالة التضاغطات الأدياباتية ، حيث $\gamma = C_p / C_v$.

إذن ، تعطى سرعة الصوت فى الغاز المثالى بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma B}{\rho}} \qquad (15\text{-}3)$$

ولكن قانون الغاز المثالى يعطى ضغط الغاز بدلالة درجة حرارته كالتالى :

$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{m}{V}\frac{RT}{M} = \rho\frac{RT}{M}$$

حيث m كتلة n moles مـن الغـاز ، M الكتلـة الذريـة أو الجزيئيـة للغـاز . إذن ، بالتعويض عن P من هذه العلاقة فى المعادلة (15-3) نجد أن :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \qquad (15\text{-}4)$$

ومن المهم ملاحظة أن اعتماد سرعة الموجة الصوتية على كل من P و ρ طبقًا للمعادلـة (15-3) قد اختفى هنا ، إذ تبين المعادلة (15-4) أن درجة حرارة الغـاز هـى متغير الحالة الديناميكية الحرارية الوحيد الذى تتعين به سرعة الصوت .

ويوضح الجدول 1-15 القيم النموذجية لسرعة الصوت فى بعض المواد عند 0°C .
لاحظ ما ذكر فى حاشية هذا الجدول عن تغير v فى الـهواء مع T .

جدول 1-15 :

سرعة الصوت* فى بعض المواد

المادة	$v(m/s)$
هواء •	331.45
أكسوجين	316
هليوم	965
هيدروجين	1284
ماء	1402
ماء (20°C)	1482
ماء (50°C)	1543
ألمنيوم	5100
نحاس	3560
حديد	5130

* هذه القيم مقاسة عند درجة 0°C مالم ينص على غير ذلك .

• تعطى سرعة الصوت فـى الهـواء بـالقرب من درجة حرارة الغرفة بالمعادلة :

$v = 331.45 + 0.61\ T$ m/s

حيث T درجة الحرارة السيليزية .

مثال توضيحى 1-15

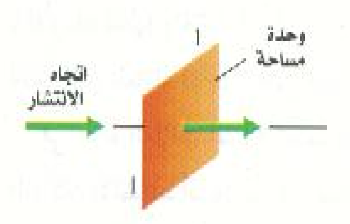
أوجد سرعة الصوت فى غاز النيون 0°C .

استدلال منطقى : يمكننا استخدام المعادلة (4-15) مع وضع $M = 20.18$ kg/kmol وحيث أن النيون غاز أحادى الذرة ، إذن $\gamma = 1.66$ (الجدول 1-12) . وعليه :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} = \sqrt{\frac{(1.66)(8314\ \text{J/kmol.K})(273\ \text{K})}{20.18\ \text{kg/mol}}} = 432\ \text{m/s}$$

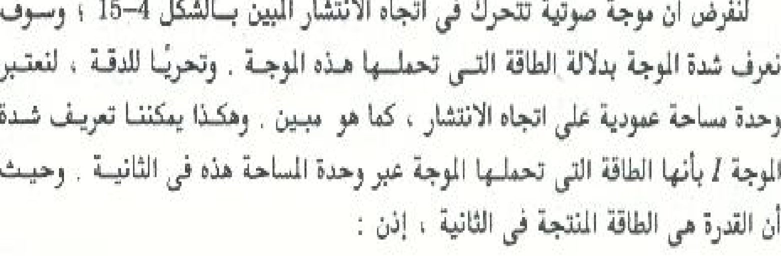
تمرين : غازان مثاليان لهما نفس الكتلة الجزيئية M ، ولكن الغاز A أحادى الذرة والغاز B ثنائى الذرة . أوجد النسبة v_A / v_B . الإجابة : 1.09

4-15 الشدة ومستوى الشدة



شكل 4-15: شدة الصوت هى كمية الطاقة المارة عبر وحدة المساحة لكل ثانية . ويجب أن تكون المساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة كما هو مبين .

رأينا فى الفصل الرابع عشر أن المصدر الذى يرسل موجة على وتر يرسل الطاقة أيضًا مع الموجة . والواقع أن جميع الموجات تحمل الطاقة معها ، وليست الموجات الصوتية استثناء من هذه القاعدة . فالمجهار المبين بالشكلين 1-15 و 2-15 ، مثلاً ، يصدر الطاقة الموجية الصوتية ، وهذه الطاقة تنتقل فى اتجاه انتشار الموجة .



لنفرض أن موجة صوتية تتحرك فى اتجاه الانتشار المبين بالشكل 4-15 ؛ وسوف نعرف شدة الموجة بدلالة الطاقة التى تحملها هذه الموجة . وتحريًا للدقة ، لنعتبر وحدة مساحة عمودية على اتجاه الانتشار ، كما هو مبين . وهكذا يمكننا تعريف شدة الموجة I بأنها الطاقة التى تحملها الموجة عبر وحدة المساحة هذه فى الثانية . وحيث أن القدرة هى الطاقة المنتجة فى الثانية ، إذن :

شدة الصوت هى القدرة المارة عبر وحدة مساحة عمودية على اتجاه انتشار الموجة .

$$I = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}}$$

ووحدات شدة الصوت فى النظام SI هى الواط لكل متر مربع ، ويوضح الجدول 2-15 شدة بعض الأصوات المألوفة مقدرة بهذه الوحدة . لاحظ أن مدى شدة الصوت الذى تستطيع الأذن أن تسمعه واسع جدًا ، وهذا يبين أن الأذن جهاز قياس صوتى مذهل الحساسية .

جدول 2-15 القيم التقريبية لشدة ومستوى شدة بعض الأصوات

نوع الصوت	الشدة (W/m^2)	مستوى الشدة (dB)
الصوت المسبب للألم	1	120
ثقابة الصخور التى تعمل بالهواء المضغوط أو ماكينة البرشمة*	10^{-2}	100
طريق كثيف المرور*	10^{-5}	700
التخاطب العادى*	10^{-6}	60
الهمس متوسط الارتفاع*	10^{-10}	20
حفيف الشجر*	10^{-11}	10
الصوت المسموع بالكاد	10^{-12}	0

* بالنسبة لشخص قريب من المصدر

ومن أهم خواص الأذن أن استجابتها لمختلف مستويات شدة الصوت تتناسب طرديًا مع **لوغاريتم I** ، بمعنى أن إحساسنا **بالجهارة** النسبية لصوتين هو (I_2/I_1) وليس مجرد I_2/I_1 . ومن ثم فإن المقياس المناسب للتعبير عن الجهارة (وتسمى **مستوى الشدة أو مستوى الصوت**) هو مقياس **الديسيبل** ، ويعرف بالعلاقة :

$$\text{مستوى الصوت بالديسيبل} \quad (\text{dB}) = 10 \log \frac{I}{I_0} \qquad (15\text{-}5)$$

حيث I هي شدة الصوت المعطى (بالواط لكل متر مربع) ؛ I_0 ، هي غالبًا ، وليس دائمًا ، أقل شدة للصوت الذى تسمعه الأذن بالكاد وتساوى 10^{-12} W/m² . لاحظ أن مستوى شدة أقل صوت مسموع هي :

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-12}}{10^{-12}} = 10 \log 1 = 0 \text{ dB}$$

وحيث أن شدة الصوت المسبب للألم 1 W/m² ، إذن مستوى شدة الصوت المسبب للألم يساوى :

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 10 \log 10^{12} = 120 \text{ dB}$$

أى أن هذا المقياس يضغط رتب العظم الاثنى عشر لشدة الصوت المسموع إلى مقياس يمتد من 0 إلى 120 dB فقط . وبينما يبين الجدول 2-15 قيم dB لمختلف مصادر الصوت التى نقابلها فى حياتنا ، يبين الجدول 3-15 قيم dB المناظرة لقيم مختلفة من الشدة .

جدول 3-15 :

مقياس الديسيبل*

الشدة (W/m^2)	مستوى الشدة (dB)
10^{-12}	0
10^{-11}	10
10^{-10}	20
10^{-9}	30
.	.
.	.
.	.
10^{-1}	110
1	120
10	130

* 1 B (bel) = 10 dB ، وتسمى بل نسبة إلى الكساندر جراهام بل مخترع التليفون .

مثال توضيحى 2-15 :

أوجد مستوى الصوت بالديسيبل dB لموجة صوتية شدتها 10^{-5} W/m² .

استدلال منطقى : من المعادلة (5-15) :

$$\text{مستوى الصوت} \ (\text{dB})\ 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-15}}{10^{-12}} = 10 \log 10^{7}$$

$$= (10)(7) = 70 \text{ dB}$$

تمرين : أوجد مستوى الصوت المكافئ لشدة قدرها 4.0×10^{-8} W/m² . **الإجابة :** 46 dB .

مثال 1-15 :

أوجد شدة صوت معين إذا كان مستوى شدته 35.0 dB .

استدلال منطقى :

سؤال : إلى ماذا ينسب مستوى الشدة ؟

الإجابة : المستوى المرجعي لقياس الشدة هو مستوى أقل صوت مسموع ، مالم ينص على غير ذلك .

سؤال : ما هو التعبير الرياضي الذي يتضمن الشدة المجهولة ؟

الإجابة : $35.0 \text{ dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0}\right)$ حيث $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

سؤال : كيف تستخرج I من اللوغاريتم (log) ؟

الإجابة : بأخذ مقابل اللوغاريتم (antilog) لطرفي المعادلة بعد القسمة على 10 . تذكر أن $\text{antilog}(\log x) = x$.

الحل والمناقشة : بقسمة طرفي المعادلة على 10 نحصل على $3.50 = \log (I/I_0)$. وبأخذ مقابل اللوغاريتم للطرفين نجد أن :

$$\text{antilog}(3.50) = 10^{3.50} = 3160$$

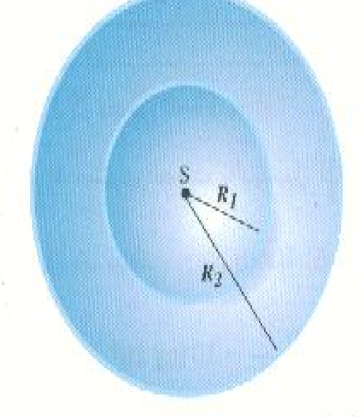
$$\text{anitlog}\left[\log\left(\frac{I}{I_0}\right)\right] = \frac{I}{I_0}$$

إذن : $\frac{I}{I_0} = 3160$ ، ومنه نحصل على :

$$I = 3160\, I_0 = 3160\,(10^{-12} \text{ W/m}^2)\; 3.16 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2$$

15-5 الشدة في حالة المصدر النقطي : (قانون التربيع العكسي)

ذكرنا في القسم 15-2 أن سعة الموجة ، وبالتالي محتوى طاقتها ، في ثلاثة أبعاد يقل عمومًا مع البعد عن المصدر . وسنقوم الآن باشتقاق تعبير لهذا النقص في الشدة مع المسافة عند انبعاث الموجات في جميع الاتجاهات من مصدر نقطي . **والمصدر النقطي** من وجهة النظر العلمية هو مصدر أبعاده صغيرة جدًا بالمقارنة بالمسافة التي تقاس عندها شدة الموجة .



شكل 15-5:
تتوزع قدرة المصدر P بانتظام على مساحة قدرها $4\pi R_1^2$ على بعد R_1 ، وعلى مساحة قدرها $4\pi R_2^2$ على بعد R_2 . إذن $P/4\pi R^2$ = الشدة .

لنعتبر مصدر نقطيًا S قدرة إشعاعه للموجات الصوتية بالواط P ، ولنتخيل كرتين متحدتي المركز نصف قطريهما R_1 و R_2 يقع مركزهما المشترك عند المصدر ، كما هو مبين بالشكل 15-5 . وسوف نفترض في هذا التحليل أن انبعاث الموجات من المصدر **متجانس فراغيًا** ، بمعنى أن الشدة واحدة في جميع الاتجاهات . وعندئذ يمكننا القول أن القدرة المنبعثة P تتوزع توزيعًا منتظمًا على سطح الكرة 1 ومساحته $A_1 = 4\pi R_1^2$.

إذن ، شدة الصوت في أي نقطة تبعد مسافة R_1 عن المصدر تساوي :

$$I_1 = \frac{P}{4\pi R_1^2}$$

وبالمثل فإن الشدة على بعد R_2 تكون :

$$I_2 = \frac{P}{4\pi R_2^2}$$

ومن هاتين العلاقتين نجد أن النسبة بين الشدتين هي :

$$\frac{I_2}{I_1} = \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2$$

وتعرف الصيغة العامة لكيفية تغير الشدة مع المسافة بقانون التربيع العكسي :

تتناسب شدة الموجات المنبعثة انبعاثًا متجانسًا فراغيًا من مصدر نقطي تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر .

وإذا فرضنا أن هناك عددًا من المصادر المستقلة التي تنبعث منها الموجات في نفس الوقت إلى مواضع مختلفة ، فإن الشدة الكلية للموجات I_{tot} في موضع ما تساوي مجرد مجموع الشدات المنفردة $(I_1, I_2, \ldots.)$ في ذلك الموضع :

$$I_{tot} = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots\ldots.. \qquad (15\text{-}6)$$

مثال 2 - 15 :

افترض أن الصوت يصلك من بوق معين بشدة قدرها I_1 ، وأن هناك بوقًا آخر يصدر نفس كمية الطاقة الصوتية ولكنه يبعد عنك مسافة تساوي نصف بعدك عن البوق الأول . افترض كذلك أن البوقين بعيدين جدًا عن موضعك بحيث يمكن اعتبارهما مصدرين نقطيين . (أ) ما هي الشدة الكلية التي تصل إليك بدلالة I_1 عندما يعزف البوقان في نفس الوقت ؟ (ب) ما هو مستوى الشدة (بالديسيبل) الذي تقيسه أثناء عزف البوقين معًا مقارنًا بمستوى الشدة في حالة عزف البوق الأول منفردًا .

استدلال منطقي :

1

سؤال : ما هي النسبة بين شدتي الموجات المنبعثة من مصدرين متساوي القدرة إذا كان بعد إحداهما عنك ضعف بعد الآخر ؟

الإجابة : تتناسب الشدة تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر ، وفي هذه الحالة $I_2/I_1 = (2/1)^2 = 4$. إذن الشدة I_2 نتيجة للبوق الأقرب 4 أضعاف الشدة I_1 نتيجة للبوق الأبعد .

سؤال : كيف تجمع الشدتان ؟

الإجابة : الشدة الكلية طبقًا للمعادلة (6-15) هي : $I_{tot} = I_1 + I_2$.

سؤال : كيف تطبق الصيغة الرياضية لمستوى الشدة عند مقارنة مستويي صوتين شدة أحدهما لا تساوي مبدى السمع I_0 ؟

الإجابة : يمكن استخدام المعادلة (5-15) لأي قيمتين للشدة .

الحل والمناقشة :

(أ) الشدة الكلية هي :

$$I_{tot} = I_1 + 4I_1 = 5\,I_1$$

(ب) الفرق في dB بين هذه الشدة وشدة البوق الأول وحده يساوي :

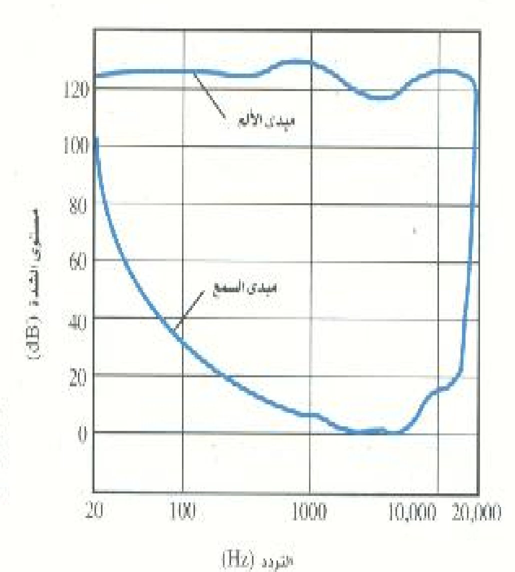
$$\text{dB} = 10\log\left(\frac{5I_1}{I_1}\right) = 10\log 5 = +7\ \text{dB}$$

تمرين : اثبت أنه كلما تضاعفت شدة الصوت مرتين يزداد مستوى الشدة بمقدار 3 dB تقريبًا . **تلميح :** لاحظ أن $\log 2 = 0.31103$.

15-6 الاستجابة الترددية للأذن

يختلف البشر في قدرتهم على سماع الأصوات . ونحن نعلم جميعًا أن سمع بعض الناس قد يضعف لسبب من الأسباب ، وبذلك تقل حساسية آذانهم بدرجة كبيرة عن حساسية إذن الشخص ذي السمع العادي . ومع ذلك يتفق معظم الناس إلى درجة كبيرة في شدة الصوت الذي يمكن سماعه بالكاد ، وكذلك في جهارة الصوت المسبب للألم . ومن ثم يمكننا وضع حدود متوسطة للقدرة السمعية للأذن البشرية .

وتعتمد استجابة الأذن للصوت على تردده بالإضافة إلى شدته . فالأذن أكثر حساسية لبعض الترددات من البعض الآخر . وقد أثبتت الدراسات أن معظم الناس لا يستطيعون سماع الموجات الصوتية التي يزيد ترددها عن حوالي 20,000 Hz . وتسمى الموجات التي يزيد ترددها عن هذه القيمة **بالموجات فوق السمعية** . بمعنى الصوت « الأعلى » أو « الأكبر » من ناحية التردد . بالمثل لا يستطيع معظم الناس أن يسمعوا الأصوات التي يقل ترددها عن حوالي 20 Hz .



شكل 15-6:
تستطيع الأذن العادية سماع الأصوات التي تقع شدتها فوق المنحنى السفلي .

الفيزيائيون يعملون توماس د . روسينج ، جامعة الينوى الشمالية

الفيزياء التطبيقية : استخدام الفيزياء في حل المشاكل



يهتم الفيزيائيون بدراسة مدى واسع جـدًا مـن الأجسـام ، ابتـداء مـن الكواركـات وانتهاء بالمجرات . ويجد الفيزيـائيون البـاحثون فـي هذيـن المجـالين ـ فيزيـائيو الجسيمات الدقيقة وعلماء الفيزياء الفلكية ـ متعة كبيرة فـي إسـهامهم فـي توسيع جبهات المعرفة الإنسانية ، ولكن بعض الفيزيائيين الآخرين يجدون متعتهم الحقيقية فى تطبيق المبادئ الفيزيائية فـي حـل المشاكل التطبيقية . وقـد كنـت أنـا واحـدًا ممـن ينـتمون إلى الفئة الأخيرة ، إذا كان الجزء الأعظم من أبحاثي فـي مجال الفيزياء التقليدية ، وهو مجال يربط بين عناصر الفيزياء والـهندسة معًا .

كان عملي الأول بعد تخرجي في شركة كبيرة من شركات الكومبيوتر ، حيـث كلفت ببحث خواص الأغشية المغناطيسية الرقيقة المقدر لـها أن تحل محـل القلوب الفيزيتية في ذاكرة الكومبيوترات عالية السرعة . ومع أن الجـزء الأكـبر مـن أبحاثنـا كـان ذا أهداف عملية في المقام الأول (كدراسة كيفية زيادة سرعة تحـول الأغشية بين الحالات المختلفة مثلاً) ، فقد أمكنني أيضًا إجراء بعض البحوث الأساسية (كالرنين الموجي المغزلي على سبيل المثال) .

وبعد انتقالي إلى مجال التدريس الجـامعي بعـد ذلـك بسـنوات قليلـة تحـول اهتمـامي إلى فيزيـاء الآلات الموسـيقية ، أي أن تخصصي البحثي قد تحول من المغناطيسية إلى الصوتيات . وخلال سنوات عديـدة قمـت مـع طلابـي بدراسـة عـدد مـن الآلات الموسيقية ، من الجيتارات إلى الأجراس ، ومن الطبـل المطـوق بالأوتـار إلى الجاميلانـات . وبتطبيـق المبـادئ الفيزيائيـة الأساسـية توصلت مجموعاتنا البحثية إلى معرفة كيف تصدر الأصوات الموسيقية من تلك الآلات ، بل تمكنا في بعـض الحـالات مـن اقـتراح بعض الطرق لتحسين هذه الأصوات .

وقد اسـتخدمنا فـي دراسـة صوتيـات الآلات الموسـيقية تقنيـات تعتمـد علـى مجموعـة مـن المبـادئ الفيزيائيـة . فـالتداخل الـهولوجرافي مثلاً يظهر أنساق اهتزاز السطح الباعث للصوت مثل سطح الجرس الصيني . وتستخدم محولات الطاقـة البيزوكهربائيـة لقياس القوة والعجلة في تقنية تسـمى التحليل النسقي بواسطة الكومبيوتـر . والواقـع أن وصـف مجـال الإشـعاع الصوتـي للآلـة الموسيقية لا يختلف كثيرًا عن وصف المجال الكهرومغناطيسي الناتج من هوائي معقد .

ويعتبر حقل الفيزياء والفنون مجالاً خصبًا وممتعًا من مجالات الدراسة . وتوجد الآن جمعية دولية صغيرة ، ولكنها مترابطـة جدًا ، من العلماء العاملين في مجال الصوتيات الموسيقية ، وقد التقيت من خلالـها بعدد من أصدقائي المقربين . وقد قيل لي أن هذا صحيح فيما يتعلق بالفيزيائيين العاملين في مجال تطبيق الفيزياء في الفنون المرئية والرقـص والفنـون المسـرحية . وللأسـف الشديد فإن الحصول على الدعم المالي اللازم لـهذه الأبحاث أمر في غاية الصعوبة . (وربما كان هذا أحد أسباب صغر جمعيتنـا السابق الإشارة إليها ، ولا يدفعنا جميعا إلى لعمل في هذا المجال إلا حبنا للبحث فقط) .

ومنذ عهد قريب ركزت جزء من اهتمامي مرة أخرى على مجال المغناطيسية ، حيـث تعـاونت مـع مجموعـة مـن البـاحثين بمعمل أرجون القومي* في دراسة ظاهرة الرفع المغناطيسي في الـهواء باستخدام المـواد فائقـة الموصليـة . وقـد كنـا نتطلـع إلى الاستفادة من نتائج بحوثنا هذه في تطبيقين مستقلين للرفع المغناطيسـي : مركبات الرفع المغناطيسي عاليـة السـرعة وحدافـات

* Argonne National Laboratory .

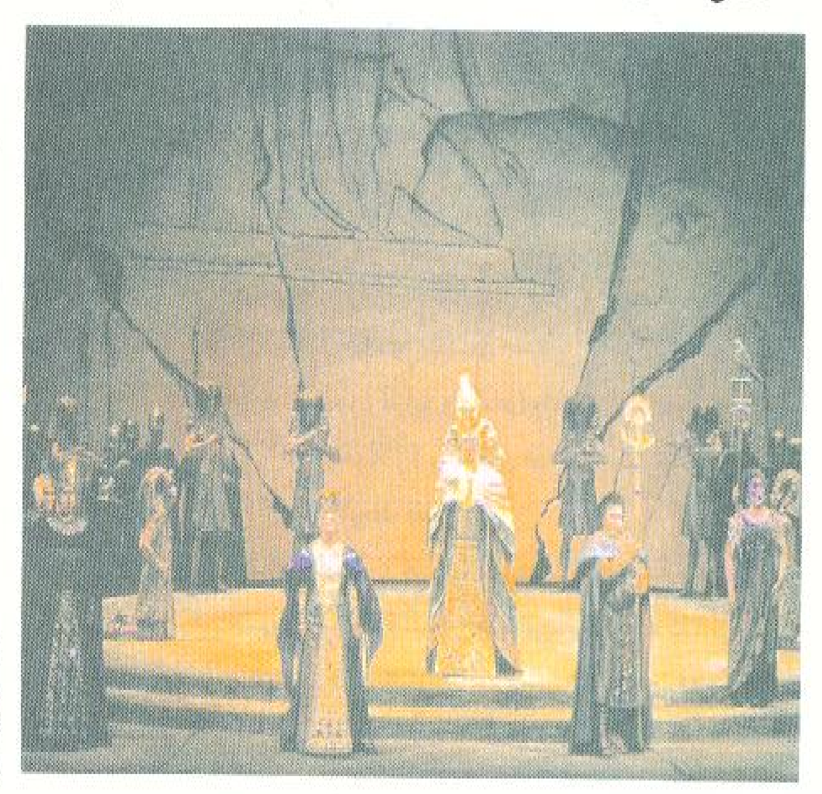
الرفع المغناطيسي لخزن الطاقة . وبالإضافة إلى الإثارة والمتعة التي نجدها في فيزياء هذا الموضوع ، فإن هذين التطبيقين يمثلان إمكانية هائلة لتحسين بيئتنا ، وهو اهتمامي الأساسي الذي لا يتغير .

يصعب في أغلب الأحيان التفرقة بين الفيزياء الأساسية والفيزياء التطبيقية . فما يبدأ كبحث لحل مشكلة علمية قد يؤدي أحيانًا إلى اكتشافات جديدة ، بل قد يؤدي إلى نيل جائزة نوبل الرفيعة (مثل الموصلية الفائقة عند درجات الحرارة العالية والليزر والترانزستور والثنائي النفقي . . إلخ) . وكذلك قد يؤدي بحث فيزيائي أساسي إلى تطبيقات عملية لم تكن متوقعة على الإطلاق .

وسواء قادتك اهتماماتك وميولك ، بالإضافة إلى فرص العمل المستقبلية (مع ملاحظ أن العمل في مجال الفيزياء التطبيقية أكثر عطاء من الناحية المادية عمومًا) ، إلى البحث الأساسي أو البحث التطبيقي لحل المشاكل العملية ، فإن من المؤكد أنه لا يخلو من التحدي والمتعة في نفس الوقت .

وتصل حساسية الأذن إلى أقصى قيمة لها بالقرب من 3000 Hz ، أما عند الترددات التي تختلف عن هذه القيمة فيكون من الضروري زيادة شدة الصوت حتى تتمكن الأذن سماعه . وهذا التغير في حساسية الأذن مع التردد موضح بالشكل 6-15 . ويمثل المنحنى السفلي في هذا الشكل أقل مستوى شدة مسموع كدالة في التردد . فمثلاً ، تستطيع الأذن العادية سماع صوت تردده 1000 Hz عندما يكون مستوى شدته حوالي 5 dB على الأقل ، بينما لا تستطيع هذه الأذن سماع صوت تردده 100 Hz إلا إذا كان مستوى شدته حوالي 30 dB على الأقل . وبالطبع فإن سماع الأصوات التي تقع تردداتها بالقرب من حدى الصوت المسموع (20 Hz و 20,000 Hz) يتطلب أن تكون شدتها كبيرة جدًا .

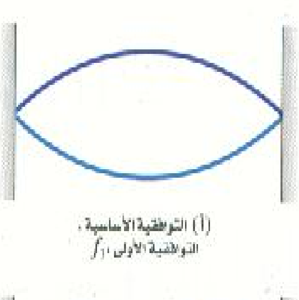
ويوضح المنحنى العلوي بالشكل 6-15 مستوى شدة الصوت المسبب للألم كدالة في



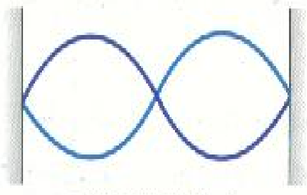
الرباعي الصوتي مثال لأربعة أصوات مختلفة في التردد والنوعية . ويؤدي امتزاج هذه الأصوات مع بعضها البعض إلى تكوين موسيقي ممتع .

التردد . لاحظ أن مستوى الشدة المسبب للألم لا يتغير كثيرًا مع التردد ، وأن مستوى شدة قدره 120 dB يعتبر مستوى مؤلمًا ؛ وقد وجد أن مثل هذه المستويات الصوتية العالية يمكن أن تسبب تلفًا دائمًا بالأذن . والحقيقة أن التعرض لأصوات مستوى شدتها حوالى 90 dB فقط لفترات طويلة يمكن أن يسبب فقدانًا تامًا للسمع ، هذا بالطبع بالإضافة إلى عوامل أخرى يمكنها أن تؤدى إلى نفس النتيجة .

15-7 درجة الصوت ونوعية الصوت



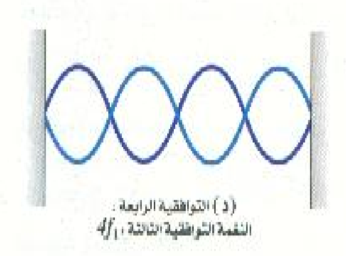
(أ) التوافقية الأساسية ، التوافقية الأولى : f_1



(ب) التوافقية الثانية ، النغمة التوافقية الأولى : $2f_1$



(جـ) التوافقية الثالثة ، النغمة التوافقية الثانية : $3f_1$



(د) التوافقية الرابعة : النغمة التوافقية الثالثة : $4f_1$

شكل 7-15:
أبسط أربعة أنماط اهتزازية للموجات المستقرة على وتر .

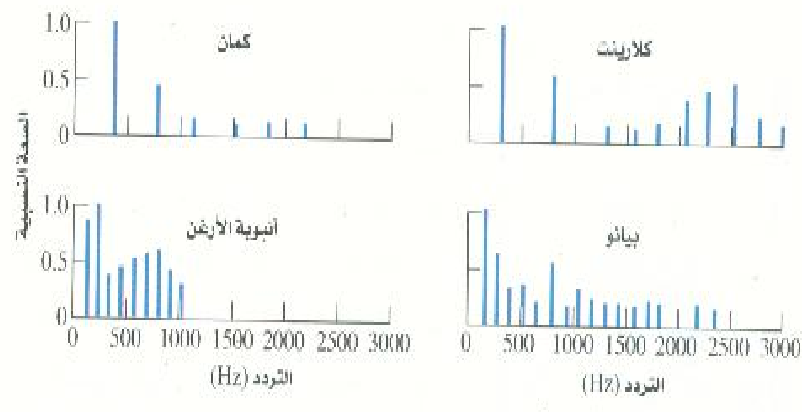
درجة الصوت هى إدراكنا الكيفى لما إذا كان صوت موسيقى معين (أى نغمة موسيقية) عاليًا (حادًا) كصوت مغنى الأوبرا السوبرانو ، أو منخفضًا (غليظًا) كصوت مغنى الأوبرا الباس . ولدراسة درجة الصوت وعلاقتها بخواص الصوت الأخرى ، يمكننا الاستعانة بالتجربة البسيطة الآتية . عندما يعمل مجهار عالى الجودة مستمدا طاقته من نظام كهربائى يولد قوة جيبية سيكون الصوت المنبعث من المجهار على شكل موجة جيبية نقية تقريبًا ، ويكون ترددها مساويًا لتردد النظام الكهربائى . وتعتبر إشارة الاختبار التى تذيعها محطات الإرسال الإذاعى أحد أشهر الأمثلة للصوت ذى التردد الواحد ، ويستطيع أى شخص غير أصم للطبقات الصوتية أن يقارن درجة هذا الصوت بدرجة أى صوت آخر . وإذا رفعنا تردد القوة الحافزة سوف يزداد بالتالى تردد الصوت المنبعث من الجهاز ، وعندئذ سوف يلاحظ السامع أن درجة الصوت الجديد أعلى من درجة الصوت الأول . وفى هاتين الحالتين تعتبر درجة الصوت مرادفًا لتردد الصوت تقريبًا . والعكس صحيح كذلك ، فإذا انخفض التردد تنخفض درجة الصوت بالتبعية .

ومع ذلك فإن الموجات الصوتية وحيدة التردد ليست شائعة بين الأصوات التى نسمعها عادة . فإذا نقر أحد أوتار الكمان مثلاً باليد أو بالقوس فلن تكون الموجة الصوتية الصادرة منه موجة جيبية نقية . ويستطيع أى شخص أن يتحقق من ذلك بسهولة عندما يقارن النغمة التى يحصل عليها عازف كمان ماهر بالنغمة التى يحصل عليها عازف مبتدئ . ففى الحالة الأولى تكون النغمة تامة وشجية ، بينما قد يحصل العازف المبتدئ على أصوات خشنة ذات صريف ومثيرة للأعصاب من نفس الوتر . ويقال عندئذ أن **نوعية النغمة** مختلفة فى الحالتين .

وكما رأينا فى القسم 10-14 ، يمكن أن يهتز الوتر اهتزازًا رنينيًا بأكثر من طريقة واحدة ، ويوضح الشكل 7-15 بعض الأنماط الاهتزازية البسيطة للوتر وأسماء هذه الأنماط . ونظرًا لأن النسبة بين الأطوال الموجية فى الحالات المبينة هى $1:\frac{1}{2}:\frac{1}{3}:\frac{1}{4}$ ، وحيث أن $f = v/\lambda$ ، فإن النسبة بين ترددات الاهتزاز لهذه الأنماط تكون 4 : 3 : 2 : 1 .

ومع ذلك فإن من الصعوبة بمكان أن نسبب اهتزاز الوتر كما هو موضح فى كل من

الأنماط المبينة بالشكل 15-7 بالضبط . وبدلاً من ذلك ، إذا أمررنا القوس على الوتر بالقرب من إحدى نهايتيه ، كما يحدث دائمًا ، سوف يهتز الوتر بعدة طرق مختلفة معًا ، ويتسبب ذلك في ظهور عدة توافقيات في نفس الوقت . ولإيجاد الاهتزاز الناتج يصبح من الضرورى علينا جمع موجات مختلف التوافقيات المثارة . وحيث أن التوافقيات المثارة تختلف في السعة عن بعضها البعض ، يجب علينا بالطبع استخدام السعة الصحيحة المناسبة لكل توافقية على حدة في عملية الجمع .



شكل 8-15:
لكل آلة موسيقية صوتها المميز . وتعتمد نوعية الصوت على التوافقيات المكونة له والسعة النسبية لكل توافقية . تمثل القضبان الرأسية الشدة (السعة) النسبية لكل موجة توافقية .

ويوضح الشكل 8-15 مثالاً نموذجيًا لاهتزاز وتر من أوتار الكمان ، حيث تمثل سعة الاهتزاز لمختلف التوافقيات في الشكل بأطوال الأعمدة الرأسية . ويلاحظ في هذه الحالة أن جميع التوافقيات ضعيفة نسبيًا باستثناء التوافقيتين الأولى والثانية . وبالرغم من ذلك فإن النغمة التى تسمعها الأذن سوف تختلف بالضرورة عن النغمة التى تسمعها عند وجود التوافقية الأولى أو الثانية وحدها .

ويوضح الشكل 8-15 أيضًا الأشكال البيانية المماثلة في حالة أصوات بعض الآلات الموسيقية الأخرى . ويمكننا أن نرى من هذا الشكل أن وتر البيانو يعطى عددًا أكبر من التوافقيات بالمقارنة بوتر الكمان . وربما يكون ذلك راجعًا إلى الطريقة المستخدمة في هز الوتر . ففي حالة الكمان يمرر العازف القوس على الوتر ببطء ونعومة ، بينما يثار اهتزاز وتر البيانو بواسطة ضربة من المطرقة .

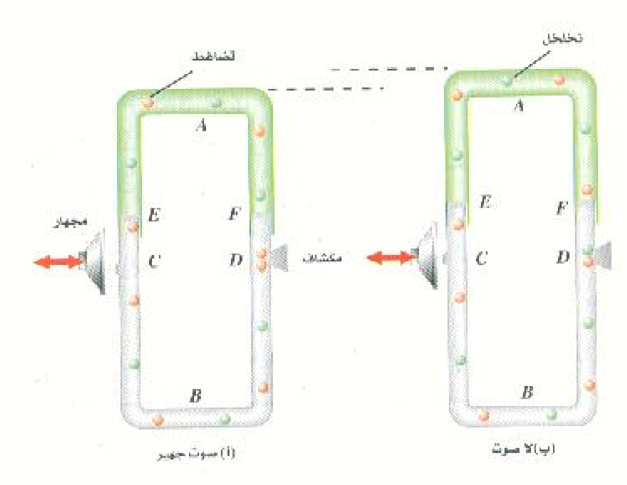
يستنتج مما سبق أن **نوعية الصوت تعتمد على عدد التوافقيات المكونة له والسعة النسبية لمختلف هذه التوافقيات** . وإذا كانت جميع الأصوات موجات جيبية نقية فإن هذا سوف يفقد الأصوات قدرًا كبيرًا من تنوعها . وعندئذ ستكون نغمة جميع الأصوات البشرية واحدة ، وعندئذ سوف يمكن تمييز صوت الشخص بالتردد المميز في مقام الصوت أو ارتفاعه فقط . كذلك فإن الموسيقى سوف تفقد قدرًا كبيرًا من جمالها لو كانت نوعية جميع الأصوات واحدة .

ليس من السهل دائمًا تحديد درجة الصوت ، وخاصة إذا كان الصوت معقدًا كصوت البيانو أو الكلارينت . ذلك أن درجة الصوت في مثل هذه الحالات ليست مرادفًا للتردد ، لأن الصوت يحتوى على عدة موجات مختلفة في التردد ومتساوية

تقريبًا فى السعة . ويوجد بين الناس من يعانون ضعفًا غير عادى فى السمع وقـد لا يعلمون هم أنفسهم بذلك ـ إذ لا يستطيع هـؤلاء سماع أى صوت يزيد تردده عـن حوالى 6000 Hz . وحيث أن معظم الأصوات التـى نسمعها تتكـون ، جزئيًا على الأقل ، من ترددات أقل من هذه القيمة فإن هؤلاء يمكنهم سماع الأصوات المسـموعة لغيرهم . مع ذلك فإن **نوعية** الأصوات التـى يسمعونها تختلـف تمامًا عـن نوعيـة الأصوات التى يسمعها شخص ذو سمع عادى . ويتضح لنا من ذلـك إذن أن نوعيـة الصوت ودرجة الصوت خاصيتان معقدتان وغير موضوعيتان إلى حد كبير .

15-8 تداخل الموجات الصوتية

لنفرض أن لدينا نظامًا أنبوبيًا كالمبين بالشكل 9-15 ، وأن موجة جيبية وحيـدة التردد قد أرسلت داخل الأنبوبة من الجانب الأيسر باسـتخدام مجـهار عـالى الجـودة . عندئذ سينقسم الصوت إلى جزئين بحيث تمر نصف الشدة خلال الجـزء العلـوى ويمـر النصـف المتبقى خلال الأنبوبة السفلية ، ومعنى ذلك أن كل أنبوبة تحمل نصف كمية الصوت ؛ وهذا الصوت عبارة عن حركة موجية فـى الـهواء تتكـون مـن سلسلة مـن التضاغطات والتخلخلات .



شكل 9-15:
تنقسم الموجة الصادرة من المجـهار إلى نصفين . وتمثل التضاغطات فـى الموجة الصوتية بالنقط الحمـراء ، بينمـا تمثـل التخلخـلات بـالنقط الخضراء . وعندما يتحـد جزئـى الموجة مرة أخرى عند المكشاف D قد ينتج صوت جهير أو ضعيـف ، ويتوقف ذلك على طول مسار كـل من نصفى الموجة الأصليـة . فـى الجـزء (أ) تقـوى التضاغطـات الموجية بعضـها البعـض فيكـون الصوت الناتج جهيرًا . وفـى (ب) أصبح طول المسار العلوى أطـول بمقدار $\lambda/2$ مـن المسار السـفلى . ونتيجة لذلك تلتقى القمة الموجيـة دائمًا مع قاع موجـى عنـد اتحـاد الموجتين ، مما يؤدى إلى تلاشـى الموجة المحصلة ، وبذلـك يكـون مستوى الصوت ضعيفًا أو صفرًا .

وفـى نهاية الأمـر تتحد الموجتان الصوتيان عند المخرج بالجانب الأيمن D حيث يوضع مكشاف صوتى كالأذن أو الميكروفون . ويمكن أن يكون الصوت المنبعث عنـد D جهيرًا أو ضعيفًا حسب موضع الأنبوبة العليا EAF . علاوة على ذلك ، إذا رفعت هـذه الأنبوبة إلى أعلى ببطئ شديد سيلاحظ أن شـدة الصوت عند D سوف تزداد ثم تقل بطريقة تبادلية . وسوف ندرس الآن أسباب هذه الظاهرة التى تعرف باسم **التداخل** .

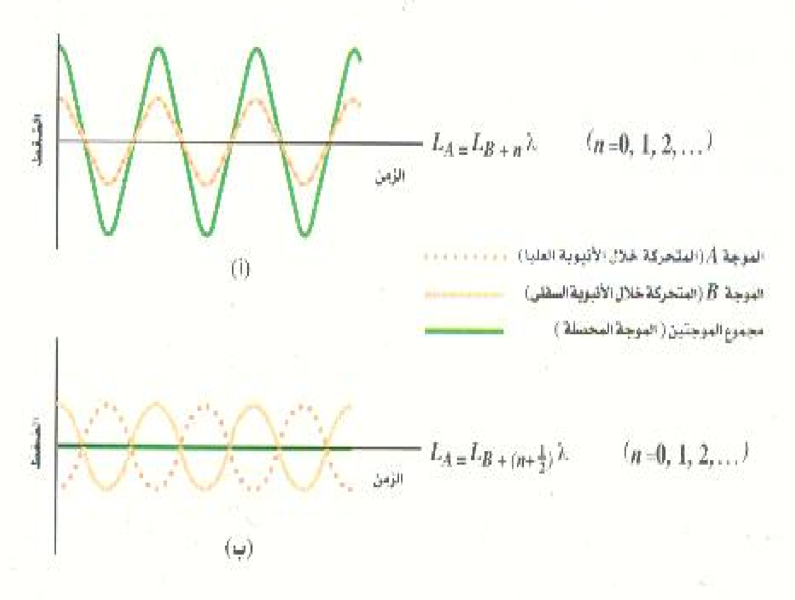
عندما ينضغط الـهواء نتيجـة لحركـة رق المجـهار إلى اليمـين تتكـون منطقـة ذات

ضغط مرتفع (تضاغط) في الأنبوبة عند C ، وهذا التضاغط يؤدى إلى تحرك تضاغطين في كلا الأنبوبتين ، واحد تجاه A والآخر تجاه B . معنى ذلك بأسلوب آخر أن التضاغط الأصلي عند C ينقسم إلى جزئين متساويين ، وأن أحدهما يتحرك إلى أعلى تجاه A بينما يتحرك الآخر إلى أسفل تجاه B . وحيث أن التضاغطات ، الممثلة في الشكل بالنقط الحمراء ، تتحرك في الأنبوبتين بسرعة الصوت ، فإن هذين التضاغطين سوف يصلان إلى النقطة D في نفس اللحظة ، بشرط أن يكون طول الأنبوبة L_A من C إلى D مرورًا بالنقطة A مساويًا لطول الأنبوبة L_B من C إلى D مرورًا بالنقطة B . وعند النقطة D يتحد التضاغطان مرة أخرى ليتكون بذلك التضاغط الأصلي الذى يخرج من الأنبوبة عند D ، وهذا الموقف موضح بالشكل 15-9 أ . لاحظ أن النقط الخضراء تمثل التخلخلات .

ويمكن تمثيل الموقف الموضح بالشكل 15-9 أ بالمنحنى البياني الموضح بالشكل 15-10 أ ، حيث رسمت موجات كل من نصفي الأنبوبة على حدة . في لحظة الانقسام عند C كانت هذه الموجات **متطاورة** مع بعضها البعض ؛ وعند اتحادهما مرة أخرى عند D بعد أن قطعت كل منهما نفس المسافة تمامًا تظل الموجات متطاورة أيضًا مع بعضها البعض . وهذا يعنى أن القمم تتقابل مع بعضها وأن القيعان تتقابل مع بعضها دائمًا عند النقطة D . وطبقًا لمبدأ التراكب المذكور بالفصل الرابع عشر فإن سعة الموجة المحصلة تساوى المجموع الجبرى لسعتى هاتين الموجتين ؛ ويوضح الشكل 15-10 أ هذه السعة الكبيرة للموجة المحصلة .

هذا الموقف السابق وصفه عاليًا مثال **للتداخل البنائي** الذى تقوى فيه سعتا الموجتين أحداهما الأخرى ، وينتج عن ذلك أن شدة الصوت عند D تكون كبيرة نسبيًا .

لننظر الآن إلى الشكل 15-9 ب ، حيث زيد طول المسار CAD بتحريك الجزء العلوى من الأنبوبة إلى أعلى مبتعدًا عن المصدر والكشاف . لنفرض الآن أن المسار العلوى أطول من السفلي بمقدار نصف الطول الموجي . في هذه الحالة سوف يتبقى على



شكل 15-10:
الموجتان A و B قد تقوى أو تلاشى أحداهما الأخرى ، ويعتمد ذلك على موضعيهما بالنسبة لبعضهما البعض . الموجتان في (أ) متطاورتان ، ولكنهما متفاوتتى الطور بمقدار 180° (أو نصف الطول الموجي) في (ب) .

نصف القمة المتحرك من C إلى D عن طريق المسار العلوى أن يقطع مسافة قدرها نصف الطول الموجى كى يصل إلى D بعد أن يكون توأمه قد وصل بالفعل إلى D عن طريق المسار السفلى ، وهذا يعنى أن الموجة المتحركة فى المسار العلوى تصل إلى D **متفاوتة فى الطور** بمقدار نصف دورة مع الموجة المتحركة فى المسار السفلى ، أى أن قمم إحدى الموجات تلتقى دائمًا مع قيعان الأخرى عند هذه النقطة . والنتيجة الحتمية لذلك طبقًا لمبدأ التراكب أن **تتلاشى** السعتان إحداهما مع الأخرى ، ولن يكشف أى صوت عند D . هذا الموقف مثال **للتداخل الهدمى ، وهو موضح بيانيًا بالشكل 10-15 ب** .

ويمكن تعميم هذه النتائج بملاحظة أن التداخل البنائى يحدث مرة أخرى عندما يزيد طول الأنبوبة العلوية عن السفلية بمقدار طول موجى كامل . ولكن يجب ملاحظة أن نصفى القمة المتكونان نتيجة لانقسام قمة معينة عند C لن يلتقيا سويًا عند D . ولكن ما يحدث فى الواقع هو أن أى قمة تصل إلى D عن طريق المسار السفلى سوف تلتقى مع قمة أخرى قد سبق انبعاثها عند C بمقدار دورة واحدة كاملة . وبالرغم من أن هاتين القمتين الملتقتين عند D لم تبدءا سويًا عند النقطة C ، فإن هذا ليس هامًا من وجهة نظر التداخل . أى أن نتائج تداخل أى موجتين تكون واحدة بصرف النظر عن **أى** القمم أو القيعان تلتقى عند نقطة التداخل . وهكذا فإن التداخل البنائى يحدث دائمًا عندما يكون المسار L_A أطول أو أقصر من المسار L_B بمقدار عدد صحيح من الأطوال الموجية . إذن :

$$L_A = L_B \pm n\lambda \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

للتداخل البنائى (للصوت الجهير) .

وبنفس الأسلوب يمكننا استنتاج الشرط العام للتداخل الهدمى ، إذ يحدث التداخل الهدمى دائمًا طالما كان الفرق بين مسارى الموجتين المتداخلتين عند موضع التداخل عددًا صحيحًا من أنصاف الطول الموجى ، إذن :

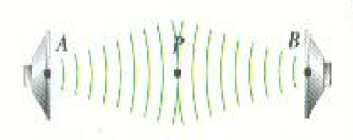
$$L_A = L_B \pm n\lambda/2 \qquad \text{حيث} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots\ldots$$

للتداخل الهدمى (لا صوت) .

وليس من الضرورى أن يكون لدينا نظامًا أنبوبيًا لكى يحدث التداخل ، إذ أن كل ما نحتاجه هو الحصول على موجتين متماثلتين تمامًا فى التردد والشكل . فإذا اتحدت هاتان الموجتان بعد قطعهما مسافتين مختلفتين فإنهما سوف تتداخلان أحداهما مع الأخرى ، ويوضح المثال التالى موقفًا آخر يتعلق بالتداخل .

مثال 3-15 :

المصدران الصوتيان المتماثلان فى الشكل 11-15 يهتزان اهتزازًا متطاورًا ويرسلان موجتين متماثلتين ($\lambda = 70$ cm) تجاه أحدهما الآخر . وقف مشاهد فى نقطة المنتصف P بين المصدرين فسمع صوتًا جهيرًا ، ثم بدأ فى الحركة ببطء تجاه المصدر B . ما هى المسافة التى يجب أن يتحركها المشاهد حتى يصبح الصوت المسموع ضعيفًا ؟



شكل 11-15:
تقوى الموجتان إحداهما الأخرى عند P إذا كان $\overline{AP} = \overline{PB}$.

استدلال منطقى :

سؤال : ما هو الشرط اللازم تحققه ليكون الصوت ضعيفًا جدًا ؟

الإجابة : عندما تصل الموجتان من المصدر إلى المشاهد متفاوتتى الطور بمقدار نصف دورة يحدث بينهما تداخل هدمى .

سؤال : لماذا لا يجب أن تصبح شدة الصوت صفرًا إذا كان هذا تداخلاً هدميًا ؟

الإجابة : تذكر أن شدة الموجات ثلاثية الأبعاد تقل مع البعد عن المصدر . وحيث أن P تقع فى منتصف المسافة بين المصدرين فإن شدتى الموجتين عند هذه النقطة تكون صفرًا . وحيث أن المشاهد يتحرك تجاه B ستكون شدة الموجات الواصلة إليه من B أكبر قليلاً من الموجات الواصلة إليه من A عند نقطة التداخل .

سؤال : فى أى موضع سوف يحدث ذلك ؟

الإجابة : عندما يكون بعد A عن المشاهد أكبر بمقدار $\lambda/2$ من بعد B عنه .

سؤال : ما هو الفرق بين هاتين المسافتين نتيجة لحركة المشاهد مسافة x تجاه B ؟

الإجابة : تزيد المسافة AP بمقدار x وتقل PB بمقدار x . إذن ، الفرق $AP - PB$ يساوى $2x$.

الحل والمناقشة : نصف الطول الموجى يساوى 35 cm . إذن :

$$AP - PB = 2x = 35 \text{ cm}$$

أى أن المشاهد يجب أن يتحرك مسافة قدرها $35 \text{ cm}/2 = 17.5 \text{ cm}$ تجاه B .

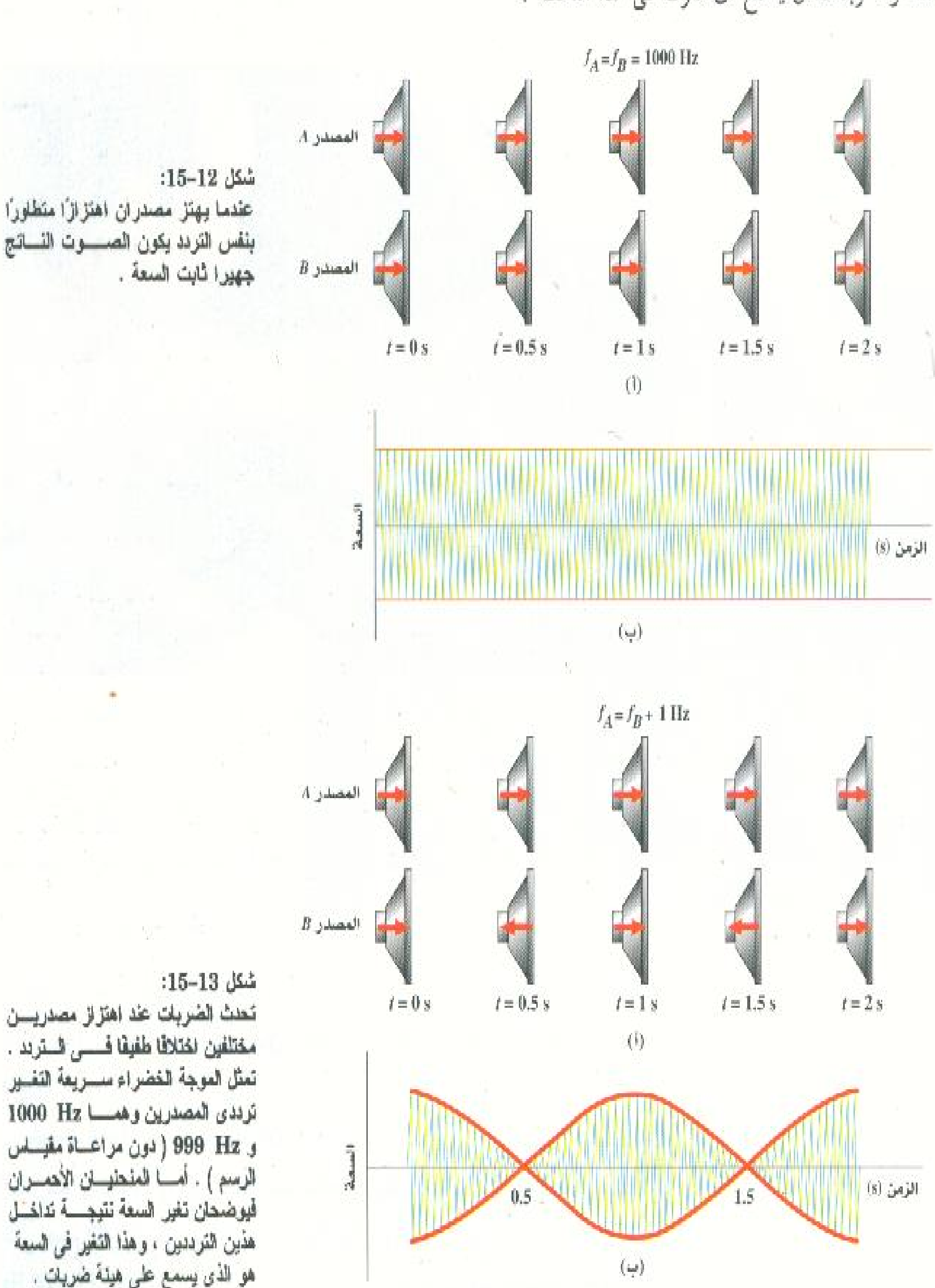
15-9 الضربات

تضبط أوتار البيانو بمقارنة نغماتها بنغمات شوكة رنانة قياسية معلومة التردد وعندما يقوم الموسيقيون بضبط أحد أوتار البيانو فإنهم لا ينصتون ببساطة إلى نغمة الوتر ليروا ما إذا كانت مماثلة لنغمة الشوكة الرنانة المستخدمة فى المقارنة ، بل يستخدموا طريقة أكثر دقة للحكم على مدى دقة ضبط الوتر ، وهى أن ينصتوا إلى **الضربات** بين صوتى الوتر والشوكة الرنانة . وهذه طريقة دقيقة جدًا لتعيين الترددات المتساوية ، وتستخدم على نطاق واسع لهذا الغرض .

لنبدأ أولاً بدراسة ما يحدث عندما يصدر مصدران مهتزان موجتين متساويتين تمامًا فى التردد ومتطاورتين (متزامنتين) إحداهما مع الأخرى . فإذا كان تردد كل من هذين المصدرين 1000 Hz مثلاً فإن محصلة تراكب الموجتين الصادرتين منهما ستكون موجة ثابتة السعة ترددها 1000 Hz أيضًا ، وهذا موضح بالشكل 12-15 . لنفرض الآن أن تردد المصدر B قد أصبح 999 Hz مع بقاء تردد المصدر A دون تغير كما هو موضح بالشكل 13-15 .

عند اللحظة $t = 0$ سيكون المجهاران متطاورين ، أى أنهما يبعثان تضاغطين فى هذه اللحظة ، كما هو مبين بالسهمين المشيرين إلى اليمين . فإذا كانت الأذن تقع على نفس البعد من كل من المجهارين سوف يصل التضاغطان إلى الأذن معًا ، وتكون النتيجة

تضاغطًا كبيرًا ويكون الصوت المسموع جهيرًا . وبمرور الزمن سوف يبدأ الجهاز B ، المهتز بتردد أصغر قليلاً من A ، في التخلف عن A . فبعد 0.5 s سيكون الجهاز A قد اهتز 500.00 مرة كاملة وبذلك ينبعث منه تضاغط في هذه اللحظة ، كما هو مبين بالشكل 13-15 عند $t = 0.5$ s . أما الجهاز B فيكون قد اهتز 499.50 مرة فقط ، وبذلك يكون متأخرًا عن A بمقدار نصف دورة بالضبط ، أي أنه سوف يبعث تخلخلاً (اتجاه السهم إلى اليسار) في نفس هذه اللحظة . وعليه فإن التضاغط المنبعث من A سوف يصل إلى الأذن في نفس اللحظة مع التخلخل المنبعث من B حيث يلاشي كل منهما الآخر ، وبذلك لن يسمع أي صوت في هذه اللحظة .



شكل 12-15:
عندما يهتز مصدران اهتزازًا متطورًا بنفس التردد يكون الصوت الناتج جهيرا ثابت السعة .

شكل 13-15:
تحدث الضربات عند اهتزاز مصدرين مختلفين اختلافًا طفيفًا في التردد . تمثل الموجة الخضراء سريعة التغير ترددي المصدرين وهما 1000 Hz و 999 Hz (دون مراعاة مقياس الرسم) . أما المنحنيان الأحمران فيوضحان تغير السعة نتيجة تداخل هذين الترددين ، وهذا التغير في السعة هو الذي يسمع على هيئة ضربات .

وباستمرار الزمن فى المرور يستمر تأخر المجهار B عن A . وبعد 1 s سيكون B قد اهتز 999 مرة كاملة بينما تكون A قد اهتز 1000 مرة كاملة ومعنى ذلك أن المصدر B سيكون متأخرًا بمقدار دورة واحدة كاملة عن A . ومن ثم سوف يبعث المصدران تضاغطين متزامنين ، ولذلك يسمع الصوت الجهير مرة ثانية .

وتتكرر هذه العملية بمرور الزمن مرات ومرات ، وهذا مبين فى الأجزاء التالية للشكل 13-15 أ . ففى اللحظات 0, 1, 2, 3, ... s يكون المصدران متطاورين ويكون الصوت المسموع جهيرًا . أما فى اللحظات 0.5, 1.5, 2.5, ... s فلن يسمع أى صوت لأن المصدرين متفاوتى الطور بمقدار $180°$.



يقوم الموسيقى بضبط الشد فى وتر البيانو لتغيير تردده . وتعتمد إحدى التقنيات المستخدمة لهذا الغرض على الإنصات إلى الضربات بين تردد الوتر وتردد مصدر صوتى قياسى .

يوضح الشكل 13-15 ب الموجة الصوتية المحصلة كدالة فى الزمن . لاحظ أن سعة الموجة المحصلة تتغير مع الزمن ، وأن السعة تنتقل من قيمة عظمى إلى التالية خلال 1 s . وتسمع الأذن هذه النبضات فى السعة بتردد قدره 1/s ، وتعرف هذه النبضات باسم الضربات . وبناء على هذا التحليل يمكننا استنتاج ما يلى :

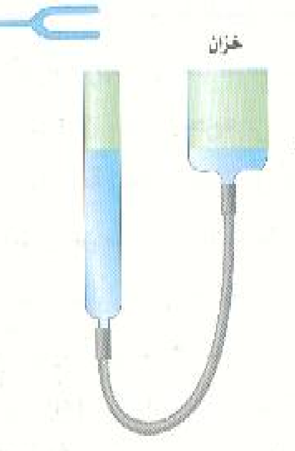
عدد الضربات فى الثانية (تردد الضربات) يساوى الفرق بين ترددى المصدرين .

فمثلاً ، عندما يكون ترددا المصدرين الصوتين 100 Hz و 97 Hz ، يكون تردد الضربات 3/s . وبالمثل ، يولد مصدران صوتيان ترددهما 5000 Hz و 5010 Hz عشر ضربات فى الثانية .

وتمنحنا ظاهرة الضربات وسيلة فائقة الحساسية لضبط الآلات الموسيقية . ولضبط أوتار البيانو مثلاً يستخدم الموسيقى مصدرًا يبعث الصوت بالتردد المطلوب ثم يقوم بتعديل شد الوتر حتى يصبح الفارق الزمنى بين الضربات كبيرًا جدًا . وبهذه الطريقة يمكن ضبط وتر تردده 5000 Hz لأقرب 1 Hz بنفس السهولة التى يمكن أن يضبط بها وتر تردده 50 Hz .

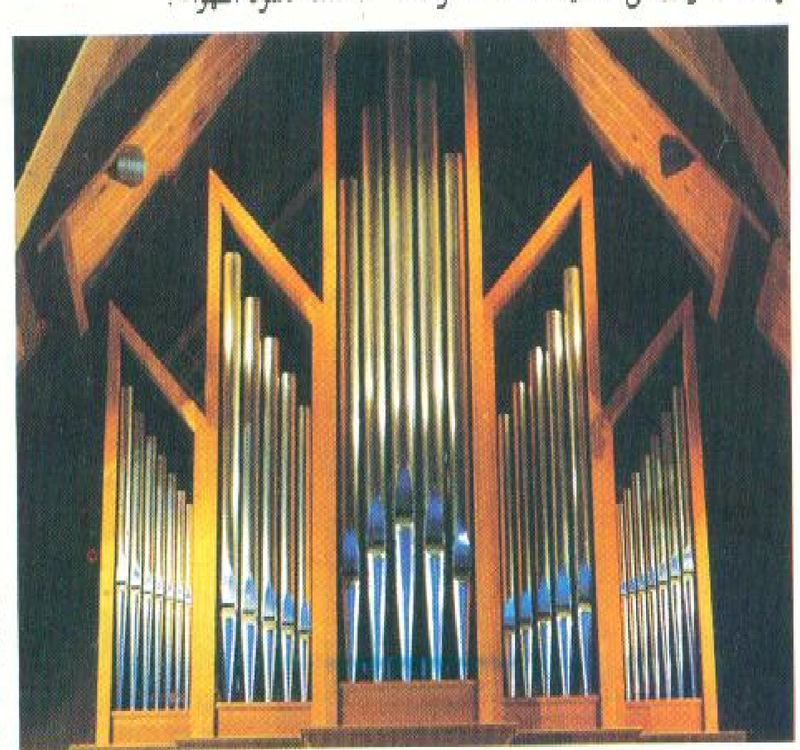
ويحدث في بعض الأحيان أن يؤدى تردد الضربات بين موجتين إلى سماع صوت ثالث متميز . فإذا فرضنا مثلاً أن تردد الصوتين 1000 Hz و 1200 Hz فإن تردد الضربات سيكون 200 Hz . وحيث أن هذا التردد يقع في مدى الترددات المسموعة فإن الأذن سوف تسمع هذا التردد بالإضافة إلى الترددين الأصليين .

15-10 الرنين في الأعمدة الهوائية



شكل 14-15:
يحدث الرنين عندما يكون مستوى الماء بالأنبوبة في الموضع الصحيح بالضبط .

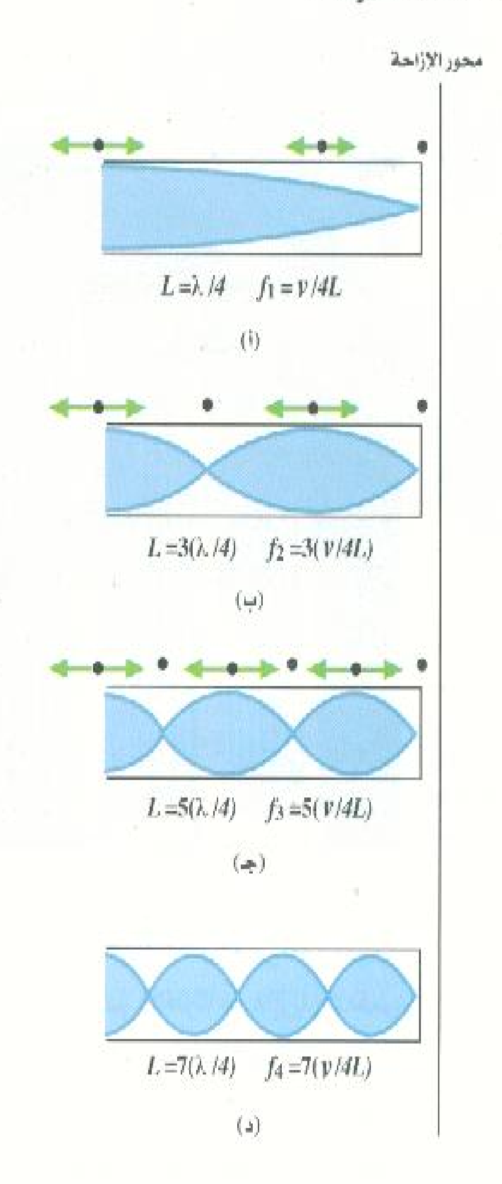
إذا وضعت شوكة رنانة مهتزة بالقرب من الطرف المفتوح لأنبوبة زجاجية مملوءة جزئيًا بالماء فإن صوت الشوكة يمكن أن يكبر بدرجة كبيرة تحت شروط معينة . ولتفسير هذه الظاهرة ، انظر التجربة الموضحة بالشكل 14-15 . توضع الشوكة الرنانة المهتزة بالقرب من فوهة الأنبوبة كما بالشكل ثم يخفض خزان الماء إلى أسفل بحيث ينخفض مستوى الماء في الأنبوبة . وعندما يصل مستوى الماء إلى ارتفاع معين سوف يهتز عمود الماء الموجود في الأنبوبة اهتزازًا رنينيًا قويًا استجابة للصوت الصادر من الشوكة الرنانة . ويحدث الرنين في الحقيقة عادة عند ارتفاعات مختلفة لعمود الهواء .



ترن أنابيب الأرغن مختلفة الطول عند ترددات مختلفة . هل يمكنك أن تذكر العوامل الفيزيائية الأخرى التي يعتمد عليها التردد الرنيني ؟

هذا الموقف يشبه إلى حد كبير حالة الموجات المستقرة على وتر مهتز . فبدلاً من الوتر المثار بواسطة مهتز عند أحد طرفيه لدينا هنا عمود هوائي ومصدر صوتي عند نهايته المفتوحة . وكما أن المهتز يرسل الموجة على الوتر المشدود كي تتحرك عليه إلى أن تنعكس عند الطرف الآخر ، فإن المصدر الصوتي هنا يرسل الموجة الصوتية في العمود الهوائي ، وهذه تنعكس خلفًا عند وصولها إلى سطح الماء . وقد رأينا في الفصل الرابع عشر أن الوتر يرن فقط عندما يستطيع الطول الموجي للموجة تكوين نمط موجي مستقر بطول الوتر . ويتحقق ذلك على وجه التحديد عندما تتكون عقدتان عند طرفي الوتر ، ومن ثم فإن الوتر يرن فقط إذا كان طوله $n\left(\frac{1}{2}\lambda\right)$ ، حيث n عدد صحيح و $\frac{1}{2}\lambda$ المسافة بين عقدتين .

ولكن هناك فرقًا جوهريًا بين رنين العمود الهوائي الموضح بالشكل 14-15 ورنين الوتر . فالعمود الهوائي في الأنبوبة مفتوح عند طرفه العلوي ومغلق بسطح الماء عند الطرف السفلي . فإذا نظرنا إلى الطرف السفلي للعمود الهوائي سنجد أن سطح الماء سوف يمنع الحركة الطولية للهواء عند هذا الطرف ، ومن ثم يجب أن تتكون عقدة لنمط الاهتزاز الرنيني في هذا الموضع . أما عند الطرف العلوي المفتوح للعمود فإن الهواء يمكنه أن يتحرك بحرية في المنطقة الواقعة فوق العمود الهوائي بالأنبوبة ؛ وبذلك تصل سعة الاهتزاز الطولي إلى أقصى قيمة عند هذه النقطة ، أي أن هذه النقطة تمثل موضع بطن موجي* . وبناء على ذلك فإن العمود الهوائي الموضح بالشكل 14-15 سوف يهتز اهتزازًا رنينيًا فقط عندما تتكون عقدة عند طرفه المغلق وبطن عند طرفه المفتوح ، وهذا لا يتحقق إلا عند أطوال موجية معينة . ويمثل الشكل 15-15 بعض أنماط الاهتزاز الرنيني لمثل هذه الأعمدة الهوائية .



شكل 15-15:
بعض الأنماط الاهتزازية الرنينية لأنبوبة مفتوحة الطرفين . هذه المنحنيات تمثل الإزاحة الطولية مقابل الموضع بطول الأنبوبة . الإزاحات النسبية موضحة فوق الأشكال (أ) و (ب) و (جـ) .

* البطن لا يوجد عند طرف الأنبوبة تمامًا . ومع ذلك فإن هذا التعقيد يمكن إهماله عادة إذا كان نصف قطر الأنبوبة أصغر كثيرًا من λ .

لاحظ أن المنحنيات الموضحة بالشكل 15-15 ليست صورة للشكل الموجي كما كانت فى حالة الوتر ، ولكنها **تمثل سعة إزاحة جزيئات الهواء على استقامة طول الأنبوبة .** كذلك فإن الإزاحة الطولية تكون صفرًا عند العقد ، وتصل إلى قيمتها العظمى عند البطون . وحيث أن المسافة بين عقدتين متتاليتين أو بطنين متتاليين تساوى $\lambda/2$ فإن المسافة بين العقدة والبطن المجاور تساوى $\lambda/4$. وإذا رمزنا لطول العمود الهوائى بالرمز L فإن هذا الطول فى الشكل 15-15 أ سيكون هو المسافة بين عقدة وبطن مجاور ، أى أن $L = \lambda/4$. أما فى الشكل 15-15 ب فإن طول العمود الهوائى يساوى ثلاثة أمثال المسافة بين العقدة والبطن المجاور ؛ أى أن $L = 3(\lambda/4)$ ، وهكذا .

يمكن إيجاد الترددات الرنينية (التوافقية) الموضحة بالشكل 15-15 من العلاقة $f = v/\lambda$. وهذه الترددات يمكن حسابها بسهولة باستخدام قيم الأطوال الموجية اللازمة لتكون الأنماط الموجية المستقرة بدلالة طول الأنبوبة كما سبق ذكره . لاحظ أن التردد الرنينى الأول فوق التردد الأساسى f_1 يساوى $3f_1$ ، وهذا التردد يسمى عادة **النغمة التوافقية الأولى** . وبالمثل فإن النغمة التوافقية الثانية تساوى $5f_1$ ، والثالثة تساوى $7f_1$ ، وهكذا . وبناء على ذلك يستنتج أن **الأنبوبة المغلقة عند أحد طرفيها تهتز اهتزازًا رنينيًا عند النغمات التوافقية الفردية فقط .**

وليس من الضرورة لحدوث الرنين أن تكون الأنبوبة مغلقة عند أحد الطرفين . فمثلاً ، يمكنك استخدام أنبوبة زجاجية صغير كصفارة بالنفخ فى أحد طرفيها ، ويمثل الشكل 15-16 عددًا من أبسط الأنماط الرنينية الممكنة لأنبوبة مفتوحة الطرفين . ويلاحظ فى كل حالة أن طرفى الأنبوبة يمثلان موضعى بطنين ، لأن الهواء يمكن أن يتحرك بحرية عند طرفى الأنبوبة . وهنا أيضًا يمكن حساب الترددات الرنينية باستخدام حقيقة أن $f = v/\lambda$ ، حيث λ معرف بالشكل فى حالة . لاحظ أن شروط الرنين للأنبوبة مفتوحة الطرفين هى نفس شروطه فى حالة الوتر المثبت من طرفيه . وحيث أن تردد الشوكة الرنانة أو أى مصدر آخر للاهتزاز يكون عادة معلومًا ، من الممكن استخدام ظاهرة الرنين فى أنبوبة كالمبينة بالشكل 15-14 لقياس سرعة الصوت .

تلخيصًا لكل ما سبق يمكننا كتابة الأطوال الموجية والترددات الرنينية لأعمدة الهوائية كما يأتى :

بالنسبة للأنبوبة المفتوحة عند أحد الطرفين والمغلقة عن الطرف الآخر :

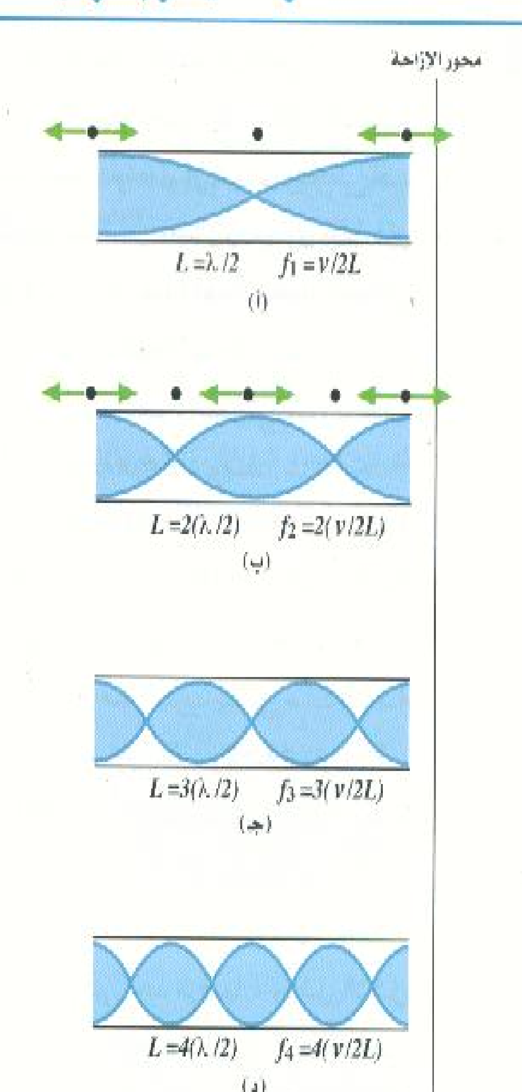
$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{4L}$$

(حيث n عدد صحيح فردى موجب) .

بالنسبة للأنبوبة مفتوحة الطرفين :

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{nv}{2L}$$

(حيث n عدد صحيح موجب ما عدا الصفر) .



شكل 16-15:
منحنيات الإزاحة فى أنماط الاهتزاز الرنينى البسيطة فى حالة أنبوبة رنين مفتوحة الطرفين .

عند النفخ فى طرف أنبوبة تؤدى هذه العملية المعقدة إلى إرسال عدد كبير من الترددات فى الأنبوبة ، ولكن الأنبوبة تهتز اهتزازًا رنينيًا استجابة لتردد واحد أو اثنين فقط من بين هذه المجموعة الكبيرة من الترددات . ولهذا السبب فإن أنبوبة الرنين تصدر صوتًا قويًا ذا تردد واحد . ومع ذلك ، إذا حاولت النفخ فى الأنبوبة بشدة كافية سوف يمكنك غالبًا أن تسبب رنينًا ذا ترددين مختلفين فى نفس الوقت ، وعندئذ سوف تصدر الأنبوبة نغمتين فى نفس الوقت .

وتستخدم فكرة الأعمدة الهوائية الرنانة فى كثير من الآلات الموسيقية . فالفلوت أو السرناى (الفلوت الصغير) يتكون أساسًا من أنبوبة يمكن تغيير طولها بواسطة فتحات فى جدار الأنبوبة . والكلارينت أيضا تشبه ذلك ؛ ولكن الصوت يتولد فيها باهتزاز ريشه الفوهة (فوهة الآلة وليس العازف) . فإذا انتقلنا إلى البوق والمترددة (الترومبون) والتوبا سنجد أنها أيضًا أنظمة رنينية أنبوبية ولكنها أكثر تعقيدًا . ففى هذه الآلات يستخرج العازف النغمات الرنينية المختلفة بتغيير طول الأنبوبة الرنينية . وبالإضافة إلى ذلك فإن الموجات الصوتية تتولد فى هذه الآلات بواسطة اهتزاز شفتى العازف فى فوهة الآلة .

مثال 4 - 15

أنبوبة أرغن مفتوحة الطرفين طولها 60.0 cm ودرجة حرارة الهواء فيها 20°C . (أ) أوجد تردد الرنين الأساسي وتردد النغمة التوافقية الأولى . (ب) كرر (أ) لنفس الأنبوبة عندما تكون مغلقة من أحد طرفيها . (جـ) إذا ملأت الأنبوبة الأصلية بغاز الأرجون عند درجة 20°C ، فما هو تردد الرنين الأساسي ؟

استدلال منطقي :

سؤال : ما هي العلاقة اللازم استخدامها لتعيين الطول الموجي ؟

الإجابة : في حالة الأنبوبة مفتوحة الطرفين ، $L = \lambda_1/2$. إذن :

$$\lambda_1 = 2L$$

سؤال : ما هي الكميات الأخرى اللازم معرفتها لكي يمكننا حساب f_1 ؟

الإجابة : حيث أن $f_1 = v/\lambda_1$ ، إذن يجب معرفة السرعة الموجية v أيضًا .

سؤال : على ماذا تعتمد السرعة الموجية ؟

الإجابة : تعتمد v على درجة الحرارة المطلقة والكتلة الجزيئية للغاز والنسبة بين الحرارتين النوعيتين للغاز γ .

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

سؤال : الهواء خليط من الغازات . كيف يمكن إيجاد كتلته الجزيئية ؟

الإجابة : الهواء يتكون أساسًا من النيتروجين N_2 ($M = 28$ kg/kmol) بنسبة قدرها 80% والأكسجين O_2 (32 kg/kmol) بنسبة قدرها 20% تقريبًا . إذن ، قيمة M للهواء هي :

$$M_{air} = (0.80)28 + (0.20)32 = 28.8 \text{ kg/kmol}$$

سؤال : النغمة التوافقية الأولى يقصد بها أي التوافقيات ؟

الإجابة : يحدث الرنين في الأنبوبة مفتوحة الطرفين عند جميع التوافقيات الفردية والزوجية . أي أن النغمة التوافقية الأولى هي f_2 .

سؤال : هل توجد أي طريقة بسيطة لإيجاد النغمة التوافقية الأولى إذا علمنا f_1 ؟

الإجابة : نعم . فحيث أن v و L ثابتان ؛ وحيث أن كل تردد رنيني f_n يتناسب مع n ، يمكننا استخدام النسب بسهولة . فإذا كان n و m يرمزان لتوافقتين مختلفتين ، فإن النسبة ببساطة تكون :

$$\frac{f_n}{f_m} = \frac{n}{m}$$

سؤال : ماذا يتغير إذا كانت الأنبوبة ذات طرف مغلق ؟

الإجابة : الطول الموجي للنغمة الأساسية والتوافقيات التي يحدث عندها الرنين .

سؤال : ما هما الطول الموجى والتردد الأساسيان الجديدان ؟

الإجابة : $\lambda_1 = 4L$ و $f_1 = \frac{v}{4L}$

سؤال : أى توافقية تكون هى النغمة التوافقية الأولى فى هذه الحالة ؟

الإجابة : فى الأنبوبة المغلقة فى أحد الطرفين والمفتوحة فى الطرف الآخر يحدث الرنين عند التوافقيات الفردية فقط . إذن النغمة التوافقية الأولى هى التوافقية الثالثة ، $f_3 = 3v/4L = 3f_1$.

سؤال : ماذا يتغير عندما تكون الأنبوبة مملوءة بالأرجون بدلا من الهواء ؟

الإجابة : الكتلة الجزيئية وقيمة γ لأن الأرجون غاز أحادى الذرة .

الحل والمناقشة :

(أ) الطول الموجى الأساسى فى الجزء (أ) ببساطة هو :

$$\lambda_1 = 2L = 1.2 \text{ m}$$

والكتلة الجزيئية للهواء تساوى 28.8 kg/mol ، كما أن قيمة γ للهواء عند 20°C تساوى 1.4 . إذن :

$$v = \left(\frac{\gamma RT}{M}\right)^{1/2}$$

$$= [(1.4)(8314 \text{ J/kmol.K})(293 \text{ K})(28.8 \text{ kg/mol})]^{1/2} = 334 \text{ m/s}$$

ويمكن أيضًا استخدام العلاقة التقريبية (الجدول 1-15) :

$$v = 331 \text{ m/s} + 0.61\,T = 331 + 12.2 = 343 \text{ m/s}$$

(تذكر أن T فى هذه الصيغة مقدرة بالدرجات السيليزية) . إذن :

$$f_1 = v/\lambda_1 = \frac{343 \text{ m/s}}{1.20 \text{ m}} = 286 \text{ Hz}$$

ومن ثم فإن النغمة التوافقية الأولى هى $f_2 = 2f_1 = 572$ Hz .

(ب) حيث أن سرعة الصوت لا تتغير فى هذه الحالة ، إذن :

$$\lambda_1 = 4L = 2.40 \text{ m} \quad \text{و} \quad f_1 = \frac{343 \text{ m/s}}{2.40 \text{ m}} = 143 \text{ Hz}$$

هذا التردد يساوى نصف التردد الأساسى فى حالة الأنبوبة مفتوحة الطرفين .

أما النغمة التوافقية الأولى فتكون :

$$f_3 = 3\,f_1 = 3(143 \text{ Hz}) = 249 \text{ Hz}$$

وهكذا نرى أن نفس الأنبوبة لها توافقيات مختلفة تمامًا ، ويتوقف ذلك على ما كانت الأنبوبة مفتوحة أم مغلقة فى أحد طرفيها .

(جـ) وأخيرًا ، الكتلة الجزيئية فى حالة الهليوم تساوى 4 و $\gamma = 1.67$ ، ولهذا تكون سرعة الصوت فى الهليوم أعلى بدرجة كبيرة . ويمكن أيضًا استخدام طريقة النسب مع

مراعاة أن γ و M تكونان تحت علامة الجذر التربيعي :

$$v_{\mathrm{He}} = v_{\mathrm{air}} \sqrt{\left(\frac{1.67}{1.40}\right)\left(\frac{29}{4.0}\right)} = 2.94\, v_{\mathrm{air}}$$

$$= (343\ \mathrm{m/s})(2.94) = 1010\ \mathrm{m/s}$$

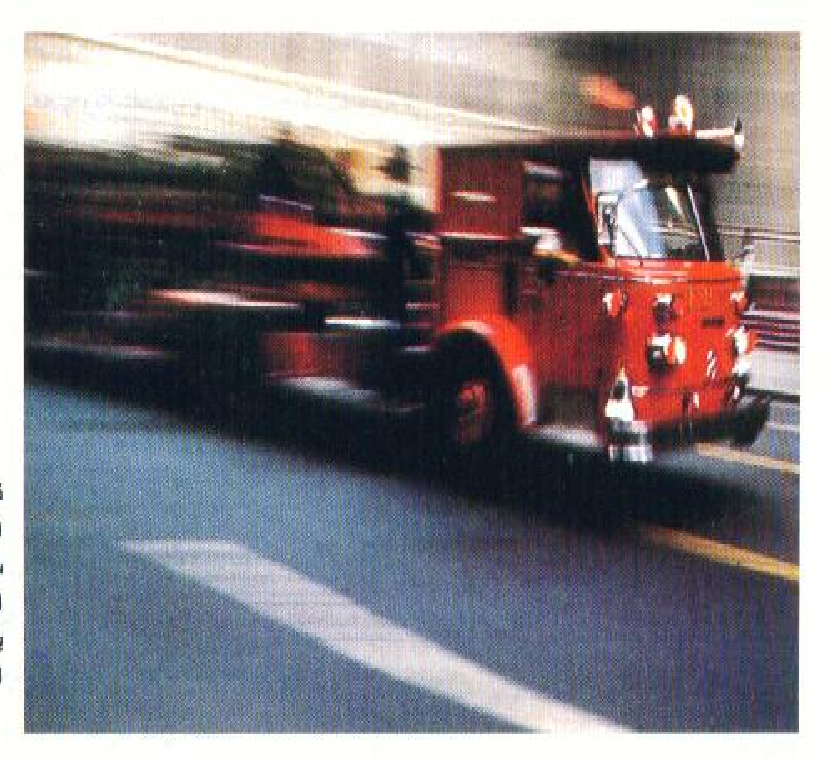
وحيث أن f يتناسب مع v ، وبملاحظة أن L يظل ثابتًا ، إذن :

$$f_1(\mathrm{He}) = \left(\frac{1010\ \mathrm{m/s}}{343\ \mathrm{m/s}}\right) f_1(\mathrm{air}) = 2.94\, f_1(\mathrm{air}) = 841\ \mathrm{H_2}$$

وهذا التأثير للهليوم على سرعة الصوت هو السبب في أن الشخص الذى يتكلم بعد استنشاقه للهليوم مباشرة يصدر صوتًا ذا درجة عالية .

15-11 ظاهرة دوبلر

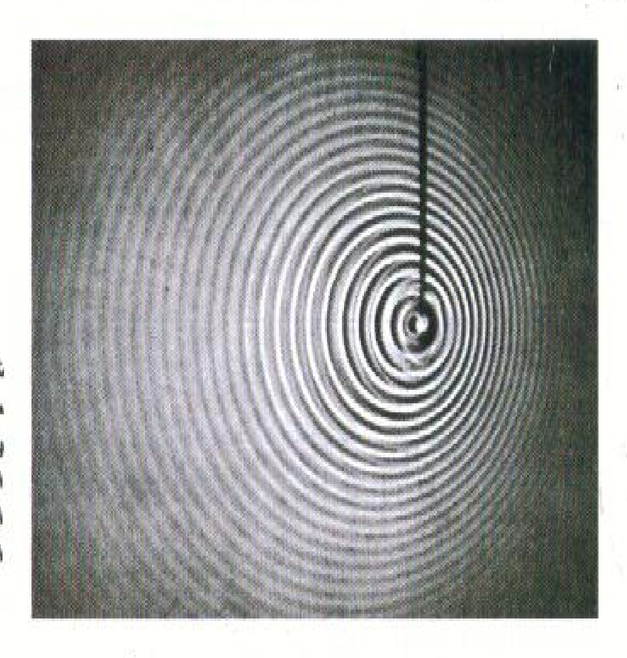
ننتقل الآن إلى ظاهرة مختلفة ولكنها عامة لجميع أنواع الموجات ، وللموجات الصوتية على وجه الخصوص ، وهى ظاهرة دوبلر* . ومن المؤكد أنك قد لاحظت هذه الظاهرة يومًا ما وإن لم تدرك سببها . فمثلاً ، عندما تتحرك سيارة إسعاف مقتربة منك بسرعة كبيرة ثم تتخطاك مبتعدة عنك يمكنك أن تلاحظ أن صوت صفارة الإنذار يسلك سلوكًا غريبًا . سوف يبدو لك أن نغمة الصفارة ترتفع أثناء اقترابها منك ثم تنخفض أثناء ابتعادها عنك . وهذا يعنى بأسلوب آخر أن تردد الصوت يرتفع عند اقتراب المصدر



تحدث ظاهرة دوبلر فى الموجات الصوتية عندما تمر بنا سيارة مطافئ سريعة ، إذ يلاحظ أن تردد الصوت المنبعث من صفارة الإنذار أو النفير ينخفض عندما يتغير اتجاه السيارة من الاقتراب منا إلى الابتعاد عنا .

* سميت الظاهرة بهذا الاسم نسبة إلى الفيزيائى النمساوى كريستيان جوهان دوبلر الذى أثبت فى عام 1842 ضرورة حدوث هذه الظاهرة فى حالة الموجات الصوتية والضوئية .

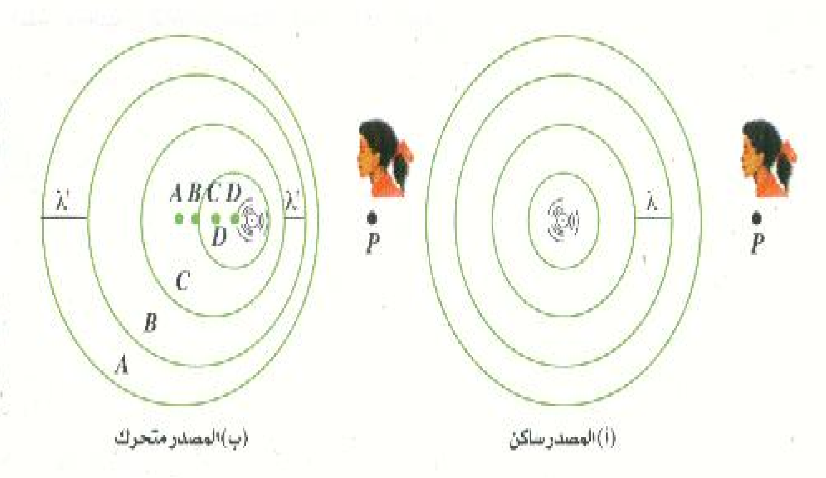
الصوتى منك وينخفض عند ابتعاده عنك . وتحدث ظاهرة مشابهة أيضًا في حالة الموجات الضوئية والموجات الكهرومغناطيسية كذلك فعندما تنعكس موجات الرادار على سيارة متحركة فإن ترددها يتزحزح بالنسبة إلى التردد الذى يرسله المصدر . ويعتمد مقدار الزحزحة الترددية على سرعة السيارة ، مما يمكن ضابط المرور من معرفة ما إذا كانت السيارة قد تعدت حد السرعة القانونية أم لا . وعمومًا فإن أى **حركة نسبية** بين مصدر الموجات مهما كان نوعها والشاهد لها تأثيرها على تردد هذه الموجات الذى يقيسه هذا المشاهد .



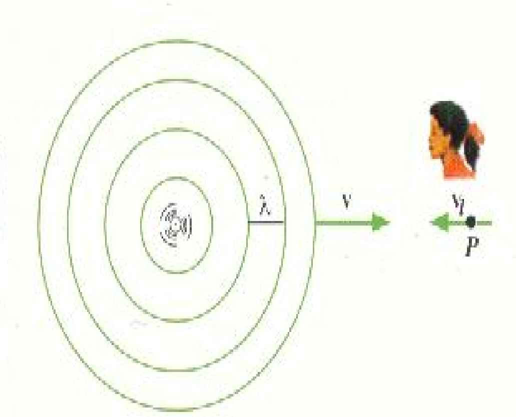
شكل 17-15:
موجات الماء المنبعثة من قضيب رأسى يهتز إلى أعلى وإلى أسفل . وحيث أن المصدر يتحرك إلى اليمين سوف يقل الطول الموجى للموجات المنتشرة في هذا الاتجاه (مركز تطوير التعليم) .

ويمكن فهم ظاهرة دوبلر بالرجوع إلى الشكل 17-15 الذى يوضح مصدرًا للموجات المائية يتحرك تجاه اليمين في الماء . فبالرغم من أن المصدر يرسل موجات دائرية إلا أن مراكز الدوائر المتتالية تتحرك إلى اليمين مع حركة المصدر ، وهذه الحركة تتسبب فى أن تصبح القمم الموجية أكثر قربًا من بعضها البعض على الجانب الأيمن للمصدر مما هى على الجانب الأيسر . وهكذا فإن حركة المصدر تؤدى فى الواقع إلى اختلاف الطول الموجى للموجات فى الاتجاهات المختلفة .

وتحدث ظاهرة مشابهة لذلك فى حالة الموجات الصوتية ، وهذا ما يمكن أن نراه بالشكل 18-15 . فإذا كان المصدر ساكنًا وكان المشاهد ساكنًا أيضا عند النقطة P سوف تسمع الأذن ترددًا مماثلاً تمامًا لتردد المصدر f ، وهذا موضح بالشكل 18-15 أ . أما الشكل 18-15 ب فإنه يوضح ما يحدث عندما يكون المصدر متحركًا والمشاهد ساكنًا . فى هذه الحالة سوف تسبب حركة المصدر اختلاف الطول الموجى للموجات المنبعثة منه فى الاتجاهات المختلفة . ونظرًا لأن حركة المصدر **لا تؤثر** على السرعة الموجية فإن تغير الطول الموجى سوف يؤدى إلى تغير تردد الصوت الذى يسمعه المشاهد الساكن . وبناء على التحليل السابق يمكننا أن نرى بسهولة أنه إذا كان المصدر متحركًا تجاه المشاهد فإن تردد الصوت المسموع سيكون أكبر من f ؛ وإذا كان المصدر متحركًا مبتعدًا عن المشاهد سيكون التردد المسموع أصغر من f .



شكل 18-15:
يعتمد تردد الصوت الذى تسمعه الفتاة على سرعة كل من المصدر والفتاة . الجزء (ب) يمثل حالة حركة المصدر إلى اليمين عندما يكون المشاهد ساكنًا . وعندما يكون المصدر فى النقطة A فإنه يرسل القمة الموجية المميزة بالحرف A ، وعندما يكون فى B فإنه يصدر القمة الموجية B ، وهكذا .



شكل 19-15:
تصل الموجات إلى المشاهد المقترب من المصدر بسرعة نسبية قدرها $v + v_l$. وعندما يتحرك المشاهد مبتعدًا عن المصدر تكون السرعة النسبية للموجات $v - v_l$.

ويختلف الموقف عندما يكون المشاهد متحركًا بالنسبة إلى مصدر ساكن ، كما هو مبين بالشكل 19-15 . فإذا كان المشاهد متحركا تجاه المصدر فإنه سوف يستقبل عددًا من الجبهات الموجية كل ثانية أكبر من العدد المنبعث بالفعل من المصدر خلال نفس الزمن ؛ أى أن المشاهد سوف يسمع ترددًا أعلى من f . وبالمثل ، عندما يتحرك المشاهد مبتعدًا عن المصدر سوف تستقبل أذنه عددًا أقل من الجبهات الموجية فى الثانية الواحدة ، وبذلك سوف يقيس المشاهد ترددًا أقل من f .

ويمكن تلخيص هذه الظاهرة وصفيًا كما يأتى :

يزداد تردد الصوت المقاس عندما يقترب المصدر والمشاهد أحدهما من الآخر ويقل عندما يبتعد أحدهما عن الآخر .

وكما أشرنا سابقًا فإن هذه الظاهرة تنطبق على جميع أنواع الموجات وليس على الموجات الصوتية فقط .

لنحاول الآن فحص ظاهرة دوبلر كميًا . يمكننا أن نرى من الشكل 18-15 ب أن المسافة بين قمتين موجبتين متتاليتين متحركتين فى اتجاه المشاهد **تقصر** بمقدار يساوى المسافة المقطوعة بواسطة المصدر خلال الزمن اللازم لانبعاث الجهتين الموجيتين المناظرتين . ولكن هذا الزمن يساوى دورة الموجات T ؛ وعليه فإن الطول الموجى الفعال المقاس يكون :

$$\lambda' = \lambda - v_s T$$

حيث v_s سرعة المصدر . وبالمثل ، عندما يكون المصدر **مبتعدًا** عن المشاهد بسرعة قدرها

v_s سوف تستطيل المسافة بين كل قمتين موجيتين متتاليتين بمقدار $v_s T$ ، وهذا يعطى :

$$\lambda' = \lambda + v_s T$$

وباستخدام العلاقتين $\lambda = v/f$ و $T=1/f$ نجد أن :

$$\frac{v}{f'} = \frac{v}{f} \pm \frac{v_s}{f}$$

أو :

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \quad \text{(للمصدر المتحرك)} \qquad (15\text{–}8)$$

حيث v سرعة الموجات في الوسط ، بينما تنطبق الإشارة الموجبة في حالة ابتعاد المصدر عن المشاهد ، وتنطبق الإشارة السالبة في حالة اقتراب المصدر من المشاهد .

لنفترض الآن أن المشاهد متحرك بسرعة أقل من سرعة الصوت مقدارها v_l . في هذه الحالة ستكون السرعة النسبية بين المشاهد والموجات $v + v_l$ عندما يكون المشاهد متحركًا **تجاه** المصدر ، وهذا هو الموقف المبين بالشكل 19–15 . أما إذا كان المشاهد متحركًا **مبتعدًا** عن المصدر فستكون السرعة النسبية $v - v_l$. معنى ذلك أن دورة الموجة لن تكون λ/v ، بل ستكون :

$$T' = \frac{1}{f'} = \frac{\lambda}{v \pm v_l} = \frac{v/f}{v \pm v_l}$$

ومن ثم :

$$f' = f\frac{v \pm v_l}{v} \quad \text{(للمشاهد المتحرك)} \qquad (15\text{–}8)$$

حيث تعنى الإشارة السالبة هنا أن الحركة **تجاه** المصدر ؛ بينما تنطبق الإشارة الموجبة عندما يتحرك المشاهد **مبتعدًا** عن المصدر . وإذا التبس عليك الأمر فيما يتعلق بالإشارة الجبرية اللازم استخدامها في موقف معين فعليك أن تتذكر القاعدة العامة السابق ذكرها . ومن المهم أيضًا ألا تنسى أن المعادلتين 7–15 و 8–15 تعطيان زحزحتين ترددیتین **مختلفين** لنفس السرعة ، ويتوقف ذلك على ما إذا كان الشيء المتحرك هو المصدر أم المشاهد .

ومع ذلك فقد أثبت أينشتين أن المعادلتين 7–15 و 8–15 غير صحيحتان في حالة الموجات الضوئية عندما يكون المصدر أو الشاهد متحركًا بسرعة قريبة من سرعة الضوء . وتنشأ هذه الصعوبة بسبب نظرية النسبية التى تنص على أن سرعة الضوء فى الفراغ لا تعتمد على حركة المشاهد أو المصدر الضوئى . وتكون الزحزحة الترددية فى مثل تلك الحالات فائقة السرعة واحدة سواء كان المتحرك هو المصدر أو المشاهد .

مثال 5-15 :

تتحرك سيارة في يوم شتاء بارد $T = 0°C$ في طريق مستقيم بسرعة قدرها 20.0 m/s وهى تطلق صوت نفيرها وتردده 500 Hz . لنفرض أنك تقف على أحد جانبي هذا

الطريق . ما هو التردد الذى تسمعه أذناك (أ) إذا كانت السيارة تتحرك مقتربة منك ؟ (ب) عندما تتحرك السيارة مبتعدة عنك ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى معادلة دوبلر التى تنطبق على هذا الموقف ؟

الإجابة : الشاهد ، وهو أنت ، ساكن . إذن ، تنطبق المعادلة (7-15) على هذا الموقف مع استعمال الإشارة السالبة فى الجزء (أ) والموجبة فى الجزء (ب) .

سؤال : ما قيمة سرعة الصوت v ؟

الإجابة : بالرجوع إلى الجدول 1-15 نجد أن سرعة الصوت عند درجة 0°C تساوى 331 m/s .

الحل والمناقشة : بالنسبة للجزء (أ) :

$$f' = 500\ \text{Hz}\left(\frac{331\ \text{m/s}}{331\ \text{m/s} - 20.0\ \text{m/s}}\right)$$

$$= 550\ \text{Hz}\ \frac{331}{311} = 532\ \text{Hz}$$

وبالنسبة للجزء (ب) :

$$f' = 500\ \text{Hz}\left(\frac{331\ \text{m/s}}{331\ \text{m/s} + 20.0\ \text{m/s}}\right)$$

$$= 550\ \text{Hz}\ \frac{331}{351} = 472\ \text{Hz}$$

وهذا الفرق فى التردد 60 Hz = 472 - 532 الذى تلاحظه عندما تعبرك السيارة فرق واضح جدًا .

تمرين : أوجد الترددين اللذين تسمعهما عندما تتحرك (أ) مقتربًا من ، (ب) مبتعدًا عن نفير ساكن بسرعة مقدارها 20.0 m/s إذا كان تردد الصوت المنبعث من النفير 500 Hz .

الإجابة : فى حالة الاقتراب $f' = 530$ Hz ، وفى حالة الابتعاد $f' = 470$ Hz .

مثال 6-15 :

تتحرك سيارة تجاهك بسرعة مقدارها v_s وبها مجهار تنبعث منه نغمة ترددها 440 Hz . وبينما كانت السيارة تقترب منك قمت أنت بتشغيل مصدر صوتى مماثل يصدر نغمة ترددها 440 Hz أيضًا ، فسمعت 20 ضربة لكل ثانية بين مصدرك الصوتى والمصدر الموجود بالسيارة . بأى سرعة تتحرك السيارة ؟

استدلال منطقى :

سؤال : ما هى العلاقة بين تردد الضربات وسرعة السيارة ؟

الإجابة : إذا كانت السيارة ساكنة لابد أن يتساوى تردد كل من النغمتين . وحيث أن السيارة متحركة ، فإن التردد الذى تسمعه من مجهارها يكون مزحزحًا نتيجة لظاهرة دوبلر ، وهذا التردد المزاح هو الذى يكون الضربات مع مصدرك .

سؤال : ماذا تمثل الضربات العشرية فى الثانية ؟

الإجابة : إنها تمثل الفرق بين تردد مصدرك f وتردد دوبلر المزحزح f' :

$$f' - f = \text{تردد الضربات} \qquad (1)$$

سؤال : ما هى المعادلة التى تعطى قيمة f' ؟

الإجابة : المعادلة (7–15) لأن السيارة تقترب منك ، مع استعمال الإشارة السالبة :

$$f' = f\frac{v}{v - v_s} \qquad (2)$$

سؤال : ما هى المعادلة التى نحصل عليها مع العلاقتين (1) و (2) ؟

الإجابة :

$$20\text{ Hz} = f' - f = f\frac{v}{v - v_s} - f$$

لاحظ أن سرعة السيارة v_s هى المجهول الوحيد فى المعادلة لأن f معلوم ولأن $v = 343\text{ m/s}$ عند $20°C$.

الحل والمناقشة : يتطلب الحل بعض المناورات الجبرية البسيطة :

$$20\text{ Hz} = 440\text{ Hz}\frac{343\text{ m/s}}{343\text{ m/s} - v_s} - 440\text{ Hz}$$

بأخذ الحد 400 Hz معامل مشترك :

$$20\text{ Hz} = 440\text{ Hz}\left(\frac{343\text{ m/s}}{343\text{ m/s} - v_s} - 1\right)$$

وبقسمة كلا الطرفين على 20 Hz وإجراء عملية الطرح داخل القوسين نحصل على :

$$1 = 22\frac{v_s}{343\text{m/s} - v_s}$$

وبحل هذه المعادلة بالنسبة إلى v_s نجد أن :

$$22v_s = 343\text{ m/s} - v_s \qquad v_s = \frac{343\text{m/s}}{23} = 15\text{ m/s}$$

15-12 السرعة فوق الصوتية

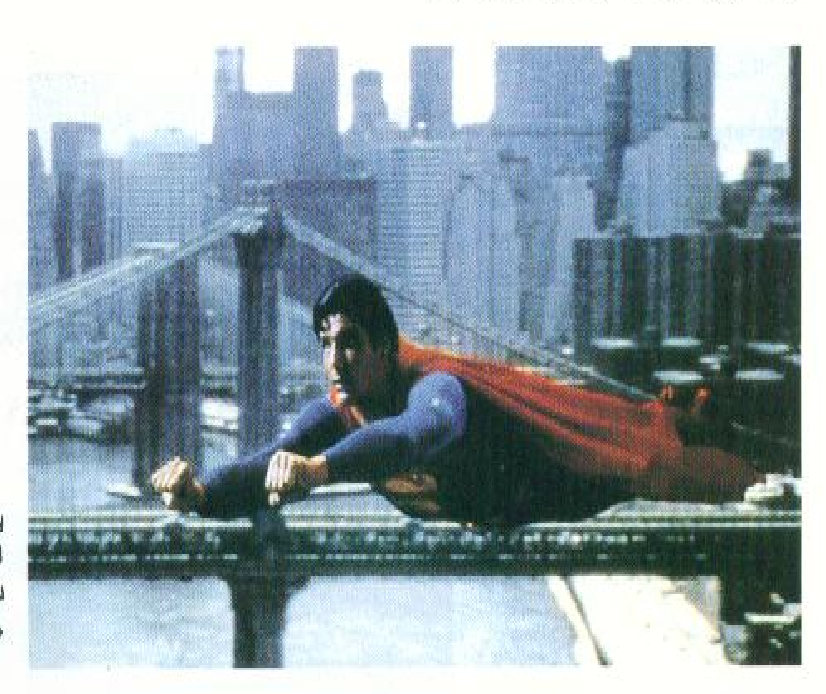
تحدث ظاهرة غريبة عندما تقترب سرعة المصدر الصوتى من سرعة الصوت أو تصبح مساوية لها . فى هذه الحالة سوف نجد من المعادلة (7–15) أن تردد الصوت f' يقترب

من ما لانهاية ، وهذا يعنى ببساطة أن عددًا لا نهائيًا تقريبًا من القمم الموجية سوف يصل إلى المشاهد فى وقت قصير جدًا . ويمكننا أن نفهم هذا بسهولة بالرجوع إلى الشكل 15-18 ب مرة ثانية .

لنفرض أن سرعة المصدر الصوتى تساوى سرعة الصوت . فى هذه الحالة سوف تقع جميع القمم الموجية الموجودة أمام المصدر فوق بعضها البعض ، مما يؤدى إلى تركيز الطاقة الموجية فى منطقة صغيرة جدًا أمام المصدر . وإذا تذكرنا أن الموجة التضاغطية يمكنها أن تتحرك فى الهواء بسرعة الصوت v فقط ، يمكننا أن نفهم ما يحدث فى الحالة التالية . عندما تتحرك طائرة فى الهواء بسرعة أعلى من سرعة الصوت v ، سوف يتحرك التضاغط الهوائى الناتج من الطائرة إلى الخارج بسرعة مقدارها v ؛ ويوضح الشكل 15-20 أ موضع هذا التضاغط فى لحظات متتالية . وعندما تتحرك الطائرة من A إلى B إلى C إلى D بالسرعة v_p يتحرك التضاغط الناتج عنها إلى الخارج بسرعة أبطأ قدرها v لتصل إلى المواضع المناظرة A' و B' و C' و D' . ومن ثم فإن الجبهة الموجية للتضاغط سوف تصنع زاوية قدرها θ مع اتجاه سرعة الطائرة ، حيث :

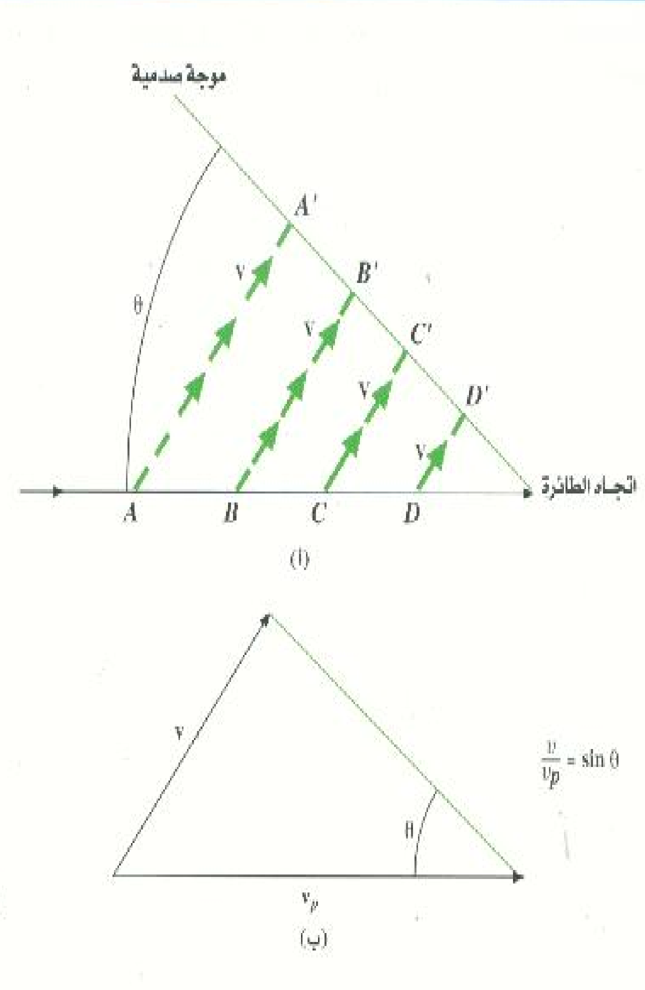
$$\sin \theta = \frac{v}{v_p}$$

وهذه الزاوية موضحة بالشكل 15-20 ب .



يبدو أن السوبرمان لا يتأثر بقوانين الفيزياء ، إذ أنه لا يولد موجة صدمية أو دوى اختراق حاجز الصوت أثناء طيرانه « بسرعة أعلى من طلقة نارية متسارعة » .

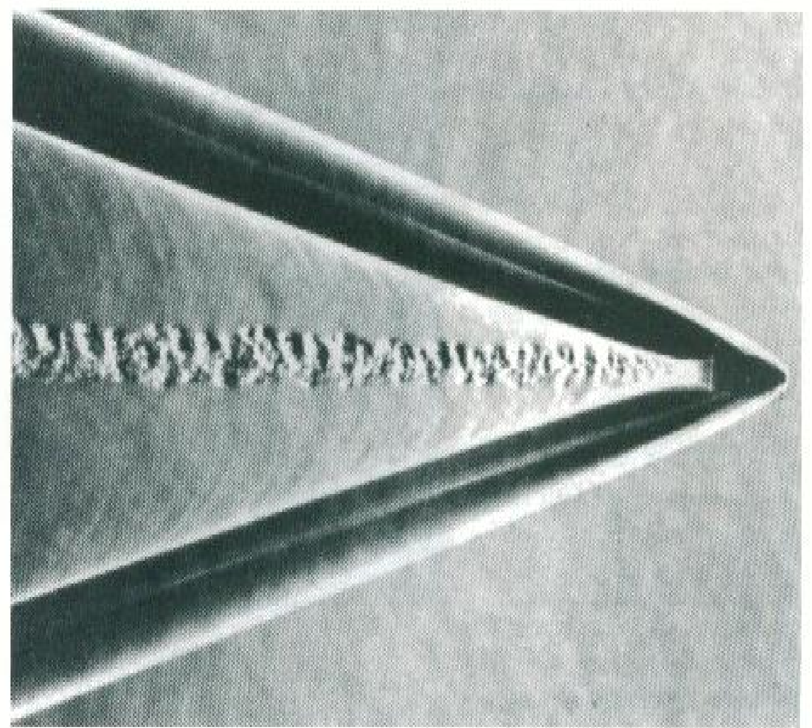
وتتحرك الموجة التضاغطية فى الواقع فى ثلاثة أبعاد ، مولدة بذلك موجة مخروطية كالمبينة بالشكل 15-21 . وتسمى هذه المنطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدًا **بالموجة الصدمية** ، وهى تسبب دويًا هائلاً عند مرورها بأى نقطة كالنقطة B فى الشكل 15-21 . ويتحرك **دوى اختراق حاجز الصوت** هذا على الأرض بسرعة تساوى سرعة الطائرة . ويلاحظ وجود فرق كبير فى ضغط الهواء عبر الموجة الصدمية . وحيث أن



شكل 20-15:
(أ) تكون الموجة الصدمية . (ب) العلاقة بين سرعة الصوت v وسرعة الطائرة v_p .

θ
طائرة فوق صوتية
موجة صدمية
C B A

شكل 21-15:
ضرب دوى اختراق حاجز الصوت النقطة C فى لحظة سابقة ، وهو يمر الآن بالنقطة B متجهًا إلى C .



شكل 22-15:
الموجات الصدمية التى تولدها رصاصة منطلقة فى الهواء .

الموجة الصدمية هى منطقة من الطاقة الصوتية المكثفة جدًا فإنها يمكن أن تسبب دمارًا شديدا لأى شىء تصطدم به ؛ وتتوقف التأثيرات التدميرية بالطبع على شدة الموجة الصدمية . ويكون هذا التدمير شديدًا بوجه خاص عند طيران الطائرات فوق الصوتية

على ارتفاعات منخفضة ، حيث لا تجد طاقة الموجة الصدمية الفرصة لتشتتها قبل ضربها للأرض .

لاحظ أن الزاوية θ تقل بزيادة سرعة الطائرة . وتعرف النسبة بين سرعة الطائرة وسرعة الصوت v_p / v **بالعدد الماخي (Mach number)** .

$$\text{Mach number} = \frac{v_p}{v} = \frac{1}{\sin\ \theta}$$

ويقال أن الطائرة تتحرك بسرعة قدرها Mach 2 إذا كانت سرعتها ضعف سرعة الصوت .

هذا ويمثل الشكل 22–15 الموجة الصدمية التي تولدها رصاصة عالية السرعة في الهواء .

هل يمكنك إثبات أن هذه الرصاصة تتحرك بسرعة قدرها Mach 3 تقريبًا بقياس زاوية الموجة الصدمية في الصورة ؟

أهداف التعليم

الآن وقد أنهيت هذا الفصل يجب أن تكون قادرًا على :

1 ـ تعريف (أ) الموجة الصوتية ، (ب) التضاغط ، (جـ) الجبهة الموجية ، (د) الشعاع ، (هـ) الموجة المستوية ، (و) الموجة الكروية ، (ز) شدة الصوت ، (ح) مستوى الشدة ، (ط) الديسيبل ، (ى) قانون التربيع العكسى ، (ك) الصوت تحت السمعى والصوت فوق السمعى ، (ل) التداخل البنائى والهدمى ، (م) نوعية الصوت ، (ن) الضربات وتردد الضربات ، (س) التوافقيات والنغمات التوافقية ، (ع) ظاهرة دوبلر ، (ف) الموجة الصدمية ، (ص) العدد الماخى .

2 ـ شرح ما هى الموجة الصوتية ولماذا لا يمكن أن ينتقل الصوت فى الفراغ .

3 ـ ذكر القيمة التقريبية لسرعة الصوت فى الهواء عند درجتى 0°C و 20°C حساب سرعة الصوت فى الغازات المختلفة عند درجات حرارة معينة .

4 ـ حساب النقص فى شدة الصوت المنبعث من مصدر نقطى كدالة فى المسافة .

5 ـ تحويل شدة الصوت بالواط لكل متر مربع إلى مستوى الصوت (مستوى الشدة) بالديسيبل . تحويل مستوى الصوت بالديسيبل إلى شدة الصوت .

6 ـ رسم شكل تخطيطى تقريبى لاستجابة الأذن العادية كدالة فى التردد . ذكر القيم التقريبية لمستوى الشدة بالديسيبل للأصوات الضعيفة جدًا والقوية جدًا . تحديد المنطقة فوق السمعية .

7 ـ شرح ما هى نوعية الصوت ولماذا تختلف عن التردد .

8 ـ إيجاد محصلة موجتين متساويتى التردد والسعة ولكنهما مختلفين فى الطور للحصول على التداخل البنائى أو الهدمى أو الحصول عليهما معًا .

9 ـ استخدام ظاهرة الضربات لإيجاد الفرق بين ترددى مصدرين صوتيين .

10 ـ إيجاد الترددات الرنينية للصوت فى أنابيب الرنين .

11 ـ شرح ظاهرة دوبلر وحساب زحزحة دوبلر فى حالة المصدر المقترب والمتباعد .

12 ـ شرح كيف تتولد الموجة الصدمية ولماذا ينشأ دوى اختراق حاجز الصوت .

ملخص

تعريفات ومبادئ أساسية :

سرعة الصوت

الموجات الصوتية هي موجات طولية (تضاغطية) . تعطى سرعة الصوت في أي وسط بالعلاقة :

$v = \sqrt{Y/\rho}$ (للوسط أحادى البعد)

$v = \sqrt{B/\rho}$ (للوسط ثنائي البعد أو ثلاثي البعد)

حيث Y معامل يونج للوسط ، B معامل المرونة الحجمي للوسط ، ρ كثافة الوسط .

تعطى سرعة الصوت في الغازات المثالية بالعلاقة :

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

خلاصة :

1 ـ تعتمد النسبة بين الحرارتين النوعيتين $\gamma = C_p / C_v$ على نوع الغاز ودرجة حرارته .

2 ـ $R = 8314$ J/kmol.K في نظام الوحدات SI ، ومن ثم يجب أن يعبر عن M بالكيلو جرامات لكل مول وعن T بالدرجات المطلقة .

3 ـ $M = 28.8$ kg/kmol.K في حالة الهواء . سرعة الصوت هي $v = 331$ m/s عند درجة 0°C وتقل بمعدل 0.61 m/s لكل درجة فوق درجات الحرارة العادية .

شدة الصوت (I)

$$\text{الشدة} = \frac{\text{القدرة}}{\text{المساحة}} \quad \text{W/m}^2$$

تتناسب شدة الصوت المنبعث من مصدر نقطى تناسبًا عكسيًا مع مربع البعد عن المصدر :

$$I(r) = \frac{P}{4\pi r^2}$$

حيث P خرج القدرة الكلية للمصدر ، r بعد النقطة التي تقاس فيها الشدة I .

مستوى الشدة أو مستوى الصوت (مقياس الديسيبل)

مستوى الشدة (أو مستوى الصوت) بالديسيبل هو $(\text{dB}) = 10 \log (I/I_0)$.

خلاصة :

1 ـ « مستوى الصوت » أو « مستوى الشدة » مصطلحان يعودان على نفس الظاهرة .

2 ـ يقع مبدى السمع عند $I_0 = 10^{-12}$ W/m² . وتؤخذ هذه القيمة عادة باعتبارها نقطة الصفر على مقياس مستوى الشدة بالديسيبل .

3 ـ الديسيبل عدد لا بعدى .

التداخل بين مصدرين صوتيين : الضربات

الضربات هي تغيرات دورية في سعة الموجة المحصلة الناتجة عن تراكب موجتين من مصدرين صوتيين مختلفي التردد f و f' .

تردد الضربات يساوى الفرق بين ترددى الموجتين .

$$\text{تردد الضربات} = f' - f$$

شروط الرنين الصوتى فى الأعمدة الـهوائية

تحدث الموجات المستقرة (الرنين) فى عمود هوائى طوله L عند الأطوال الموجية والترددات الآتية :

1 ـ فى حالة العمود الـهوائى المغلق عند أحد طرفيه والمفتوح عند الطرف الآخر :

$$\lambda_n = \frac{4L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{4L}$$

حيث n عدد صحيح فردى موجب .

2 ـ فى حالة العمود الـهوائى مفتوح الطرفين

$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{2L}$$

حيث n أى عدد صحيح موجب .

خلاصة :

1 ـ فى كلتا الحالتين $n = 1$ تسمى **التوافقية الأساسية** ، وهى تمثل حالة أكبر طول موجى وأصغر تردد .

2 ـ يسمى كل تردد تال أعلى **نغمة توافقية** . ويسمى العدد n العدد **التوافقى** للرنين . ترن الأنبوبة المفتوحة عند أحد الطرفين والمغلقة عند الطرف الآخر عند التوافقيات الفردية فقط . أما الأنبوبة مفتوحة الطرفين فترن عند التوافقيات الفردية والزوجية .

ظاهرة دوبلر

تحدث ظاهرة دوبلر طالما كان المصدر الصوتى والمشاهد متحركين حركة نسبية أحدهما بالنسبة إلى الآخر .

يزداد التردد المقاس (أو المسموع) عندما يقترب المصدر والمشاهد أحدهما من الآخر ، ويقل عندما يبتعد أحدهما عن الآخر . يرتبط التردد المشاهد f' بتردد المصدر f تبعا للعلاقة :

$$f' = f\frac{v}{v \pm v_s} \quad \text{(للمصدر المتحرك)}$$

$$f' = f\frac{v \pm v_l}{v} \quad \text{(للمشاهد المتحرك)}$$

حيث v سرعة الصوت ، v_s سرعة المصدر ، v_l سرعة المشاهد .

خلاصة :

1 ـ تختار الإشارة الجبرية بما يتفق مع الوصف الكمى السابق .

2 ـ يفترض أن كلاً من v_s و v_l أصغر من v فى كلتى الحالتين .

السرعة فوق الصوتية : العدد الماخى

تتولد الموجة الصدمية عندما تزيد سرعة الجسم v_p عن سرعة الصوت v . تصنع الموجة الصدمية زاوية مخروطية θ مع اتجاه حركة الجسم ، حيث :

$$\sin\theta = v / v_p$$

$$\frac{v_p}{v} = \text{Mach number} = \frac{1}{\sin\theta}$$

أسئلة وتخمينات

1 ـ اشرح لماذا لا يمكن سماع صوت جرس يدق داخل غرفة مفرغة بالخارج .

2 ـ هل تتوقع أن يكون تردد الصوت المسموع تحت الماء مساويًا لتردد الصوت المسموع فى الهواء إذا كان المصدران متماثلين تمامًا ؟ اشرح .

3 ـ عندما يستنشق شخص غاز الهليوم ثم يتكلم بعد ذلك مباشرة فإن درجة صوته تكون أعلى . اشرح .

4 ـ لنفرض أن مجموعة من أنابيب الأرغن قد ركبت بالقرب من سخان ساخن . هل يؤثر ذلك على عمل الأرغن ؟ اشرح .

5 ـ يمكن عمل صفارة إنذار (سرينة) بثقب مجموعة من الفتحات على أبعاد متساوية في دائرة متمركزة مع قرص معدنى صلب . وعندما تدور هذه الدائرة أثناء اندفاع تيار هوائى عليها بالقرب من الفتحات تنبعث منها نغمة شبيهة بصفارة الإنذار . اشرح كيف يعطى ذلك إحساسًا بالصوت للأذن ، واذكر العوامل التى تؤثر على درجة ونوعية الصوت .

6 ـ يدعى مغنى أنه يستطيع تحطيم كأس نبيذ بأن يغنى نغمة معينة . هل يمكن أن يكون هذا صحيحًا ؟ اشرح .

7 ـ افترض أن نوعًا من الكائنات البشرية يعيش على كوكب بعيد ، وأن أجهزتها السمعية مصممة كالتالى . تبدو رؤوس هذه الكائنات من الخارج كرؤوسنا نحن سكان الأرض . ومع ذلك فإن الأذنين متصلتان إحداهما بالأخرى عن طريق قناة صلبة الجدار ذات مقطع دائرى قطره 1 cm . ويقع فى منتصف هذه القناة غشاء دائرى رقيق يعمل كجلدة الطبلة ويقسمها إلى نصفين متساويين ؛ وينتج الإحساس السمعى لدى هذه الكائنات عند اهتزاز هذا الغشاء . ما الذى يمكنك أن تستنتجه عن القدرات السمعية لهذه الكائنات وعن طرق الاتصال الشفهى بينها ؟

8 ـ قناة الأذن هى أنبوبة مجوفة تصل ما بين الأذن الخارجية وطبلة الأذن ، وطول هذه القناة فى الشخص البالغ حوالى 2.5 cm . إلى أى حد يتفق التردد الرنينى لهذه القناة مع منحنى حساسية الأذن ؟

9 ـ قدر الترددات الرنينية لأنبوبة اختبار طولها 15 cm فى حالة النفخ عبر حافتها .

10 ـ ينبعث صوت تردده 1000 Hz من مصدر صوتى فى جميع الاتجاهات أثناء هبوب ريح قوية على المصدر اتجاهه نحو الشرق . كيف يعتمد التردد والسرعة والطول الموجى للصوت المسموع على موضع المشاهد ؟

11 ـ مجهاران متصلان بجهاز استريو . وتقول تعليمات تشغيل الجهاز « ضع المجهارين جنبًا إلى جنب ووصل السلكين الأحمرين من المكبر إلى الطرفين الموجودين بظهر أحد المجهارين ، ثم وصل السلكين الرماديين من المكبر إلى الطرفين الموجودين بظهر المجهار الآخر واستمع إلى الصوت . اعكس وضع السلكين الأحمرين عند المجهار بحيث يصبح السلك الذى كان متصلاً بالطرف الأيسر للمجهار متصلاً بالطرف الأيمن ، والعكس بالعكس ، ثم استمع إلى الصوت مرة أخرى . اختر طريقة التوصيل النهائى بحيث تحصل على أقوى صوت » . اشرح الأسباب الفيزيائية لهذه التعليمات .

مسائل

(اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء 343 m/s ما لم ينص على غير ذلك)

القسم 3-15

1 ـ سمع صوت الرعد بعد زمن قدره 5.5 s من رؤية وميض البرق . على أى بعد حدث البرق ؟ افترض أن بالإمكان إهمال الزمن الذى يستغرقه الضوء للوصول إلى المشاهد ، وذلك لأن سرعة الضوء (3×10^8 m/s) أكبر كثيرًا من سرعة الصوت .

2 ـ يسمع الصوت الصادر من مدق الخوازيق بعد اصطدام المدق بالخازوق بزمن محسوس . ما مقدار هذا التأخر الزمنى إذا كان بعد المشاهد عن مدق الخوازيق 630 m ؟ اعتبر أن سرعة الصوت مهملة بالنسبة إلى سرعة الضوء كما فعلت فى المسألة 1 .

3 ـ يهتز وتر جيتار بتردد قدره 530 Hz . ما هو الطول الموجي للصوت المنبعث من الوتر ؟ كرر ذلك بالنسبة للترددين 180 Hz و 1550 Hz .

4 ـ تحدد الخفافيش مواضع الأشياء في الظلام بإرسال صوت ذي تردد فوق سمعي قدره 57 kHz وملاحظة كيفية انعكاسه على الأشياء . ما هو الطول الموجي المناظر ؟ وإذا كان الطول الموجي للصوت المنبعث من الخفاش 1.33 mm ، فما قيمة تردد هذا الصوت ؟

5 ـ استخدم المعادلة المذكورة في حاشية الجدول 1–15 لحساب سرعة الصوت في غاز النيتروجين عند درجة 20°C .

6 ـ استخدم المعادلة (4–15) لحساب سرعة الصوت في الهواء عند درجتي 0°C و 20°C– . اعتبر أن الكتلة الجزيئية للهواء 29 . كرر ذلك بالنسبة إلى غاز الهليوم .

7 ـ استخدم قيمة معامل المرونة الحجمية للزئبق لإيجاد سرعة الصوت في هذه المادة .

8 ـ احسب معامل المرونة الحجمية للألنيوم باستخدام كثافة الألنيوم والبيانات المعطاة بالجدول 1–15 .

9 ـ سرعة الصوت في العظم 3455 m/s عندما يكون تردده 1 MHz ، وكثافة العظم حوالى $1.85\ g/cm^3$. احسب معامل المرونة الحجمية للعظم عند هذا التردد .

10 ـ ما هو التغير المئوي في سرعة الصوت في الهواء إذا تغيرت درجة حرارته بمقدار 1°C من 20°C إلى 21°C .

11 ـ يرسل مسبار الأعماق في سفينة صيد الأسماك موجات صوتية في الماء إلى أسفل ثم يستقبل الموجات المنعكسة . وقد اكتشف هذا الجهاز وجود قطيع من الأسماك على عمق 3.85 m تحت السفينة مباشرة ، وكانت درجة حرارة الماء في تلك اللحظة 20°C . (أ) ما هو الزمن المار بين إرسال الموجة الصوتية واستقبالها بعد انعكاسها على قطيع الأسماك ؟ (ب) لكي يمكن إيجاد المسافة يجب أن يستقبل الجهاز النبضة الموجية المنعكسة قبل إرسال النبضة التالية . ما هو أعلى تردد يمكن أن ترسل بها النبضات حتى يمكن كشف هذا القطيع المائي ؟ هل يجب أن يزيد تردد إرسال النبضات أم يقل إذا أريد كشف قطيع مائي على أعماق أقل من ذلك ؟

▪ 12 ـ ذهبت أنت وصديقتك ذات مساء للتمشي على خط السكة الحديد ، ورأيتما فرقة من العمال يقومون بإصلاح القضبان على مسافة معينة منكما . وضعت صديقتك أذنها على القضيب الحديدى بعد اتفاقكما على أن تعطيك إشارة عند سماعها لطرقة المطرقة على القضيب وأنت واقف بجانبها ، فلاحظت أنك تسمع ضربة المطرقة في الهواء بعد 2.56 s من إشارتها . على أى بعد توجد فرقة العمال منكما ؟

القسمان 4–15 و 5–15

13 ـ يستهلك نظام استريو الطاقة بمعدل قدره 75 W . ويحتوى هذا النظام على مجهارين يخرج الصوت من كل منهما من مساحة قدرها $50\ cm^2$. فإذا كانت القدرة الصوتية الخارجة من كل مجهار 0.085 W ، فما هى شدة الصوت عند كل مجهار ؟ ما هى كفاءة النظام فى تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة صوتية ؟

14 ـ مجهار معين ذو فتحة دائرية مساحتها $52\ cm^2$ ، ولنفرض أن الصوت ينبعث إلى الخارج انبعاثًا منتظمًا خلال الفتحة كلها . فإذا كانت شدة الصوت عند الفتحة $4.35 \times 10^{-4}\ W/m^2$ ، فما مقدار القدرة المنبعثة على هيئة صوت ؟

▪ 15 ـ حزمة صوتية شدتها $4.25 \times 10^{-6}\ W/m^2$. ما هو مستوى الشدة بالديسيبل ؟

▪ 16 ـ ما قيمة مستوى الشدة بالديسيبل لصوت شدته $0.55\ W/m^2$ ؟

▪ 17 ـ (أ) صوت مستوى شدته 33 dB ، ما هى شدة هذا الصوت ؟ (ب) إذا كان مستوى الصوت 33 dB بالقرب من مجهار مساحته $90\ cm^2$ ، فما هى كمية الطاقة الصوتية الخارجة من المجهار فى كل ثانية ؟

■ 18 ـ يعمل ثمانية أشخاص على آلاتهم الكاتبة في غرفة واحدة ويسببون حدوث ضوضاء بها مستوى شدتها المتوسط 56 dB . ماذا سيكون مستوى الشدة بالغرفة عندما يبدأ ثلاثة أشخاص إضافيين في الطرق على آلاتهم الكاتبة ، بفرض أن كلاً منهم يصدر نفس كمية الضوضاء ؟

■ 19 ـ مستوى الصوت في غرفة يتحدث بها 35 شخصًا يساوي 63 dB . كم شخصًا يلزم خروجهم من الغرفة لكي ينخفض مستوى الصوت بها إلى 57 dB ؟ افترض أن كلاً من هؤلاء الناس يتكلم بنفس الشدة كالآخرين .

■■ 20 ينبعث الصوت من مصدر صوتي صغير بانتظام في جميع الاتجاهات . فإذا كانت الشدة 3.5×10^{-3} W/m² على بعد 5.2 من المصدر ، (أ) ما هو مقدار الطاقة الصوتية المنبعثة من المصدر في كل ثانية ؟ (ب) ما قيمة الشدة على بعد 2.0 m من المصدر ؟

■ 21 ـ ما هي شدة الصوت في مكان مستوى الصوت فيه 25 dB ؟

■ 22 ـ أوجد شدة الصوت في غرفة مستوى الشدة فيها 88 dB ؟

■ 23 ـ حزمة صوتية مساحة مقطعها 2.75 cm² ومستوى شدتها 105 dB . سقطت هذه الحزمة على لوح ممتص للصوت فامتصت فيه تمامًا . ما مقدار الطاقة المنتقلة إلى اللوح في زمن قدره 1 min ؟

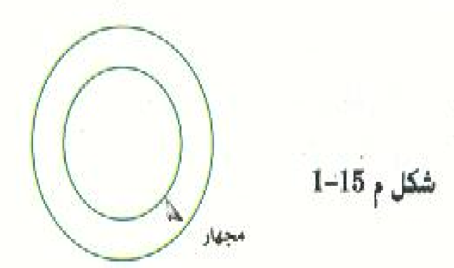
■■ 24 ـ زاد مستوى شدة صوت معين إلى 6 أضعاف فزادت شدته إلى خمسة أضعاف . ما هي الشدة الأصلية لهذا الصوت ؟

25 ـ مكبر صوتي في نظام استريو معين معامل كسبه 35 dB . ما هو معامل تكبير هذا المكبر للصوت الذي يستقبله ؟

■ 26 ـ قيس مستوى شدة الصوت المنبعث من مصدر صوتي متجانس صغير على بعد 45 m فوجد أنه 85 dB . ما هو خرج القدرة الكلي لهذا المصدر ؟

القسمان 8-15 و 9-15

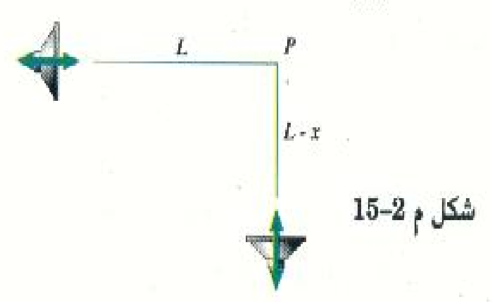
27 ـ وضع مجهار صغير في أنبوبة ملتوية على شكل دائرة ومملوءة بالهواء كما هو مبين بالشكل م 1-15 . فإذا كان نصف قطر الدائرة 1.35 m ، فما هي أصغر ثلاثة ترددات يمكنها أن تنتج صوتًا قويًا ؟ (لم يراع مقياس الرسم في هذا الشكل) .



شكل م 1-15

■ 28 ـ يرسل المجهار المبين بالشكل م 1-15 الصوت خلال الأنبوبة المجوفة على هيئة دائرة والمملوءة بالهواء . وتهتز هذه الأنبوبة اهتزازًا رنينيًا عند ترددات المجهار 66, 132, 198, 264 Hz بالإضافة إلى الترددات الأعلى . ما هو طول محيط الدائرة ؟ افترض أن المجهار أصغر كثيرًا مما هو مبين بالشكل .

■ 29 ـ يهتز المجهاران المبينان بالشكل م 2-15 اهتزازًا متطاورًا بتردد قدره 3400 Hz . ما هي قيمة x التي يكون الصوت عندها (أ) جهيرًا عند النقطة P ؟ (ب) ضعيفًا عند النقطة P ؟



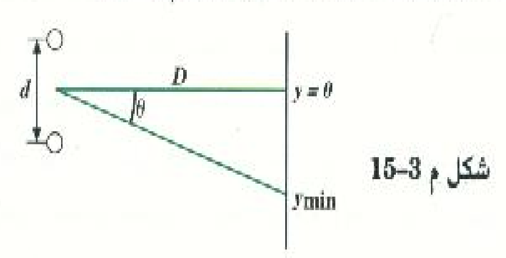
شكل م 2-15

■ 30 ـ يهتز المجهاران المتماثلان الموضحان بالشكل م 2-15 اهتزازًا متطاورًا بنفس التردد ، حيث $L = 27.5$ cm أكبر من $L - x$. زيد تردد الموجات المنبعثة من المجهارين ببطئ ابتداء من 15 Hz . عد أي تردد يسمع مشاهد عند النقطة P (أ) أول أقصى جهارة ؟ (ب) أول أدنى جهارة ؟

■■ 31 ـ مجهاران صغيران يواجه أحدهما الآخر ، ويقع أولهما عند النقطة $x = 0$ ، ويقع الآخر عند النقطة $x = 4.6$ m . فإذا كان المجهاران يرسلان موجات صوتية متطاورة طولها الموجي 42 cm ، ففي أي النقط على استقامة الخط الواصل من $x = 0$ إلى $x = 4.6$ m يسجل مكشاف أضعف صوت ؟

■■ 32 ـ افترض موقفًا كالسابق وصفه في المسألة 31 مع استبدال المجهارين بمصدرين صوتيين متغيري التردد . فإذا بدأنا في تغيير التردد من الأدنى إلى الأعلى ، فعند أي الترددات يسمع الصوت ضعيفًا عند النقطة $x = 1.6$ m ؟

■■ 33 ـ يمثل الشكل م 4-15 مجهارين صغيرين جدًا (بحيث يمكن اعتبارهما مصدرين نقطيين) يبعد أحدهما عن الآخر مسافة قدرها d ، ولنفرض أن مشاهدًا يقف عند الموضع $y = 0$ الذي يبعد مسافة قدرها D عن نقطة منتصف المسافة بين المجهارين . لنعتبر كذلك أن المجهارين يبعثان صوتين متطاورين تردد كل منهما 820 Hz . وحيث أن المشاهد يقف في الوضع $y = 0$ الذي يقع على نفس البعد من كل من المجهارين فإنه سوف يسمع الصوت بأقصى شدة . بدأ المشاهد الآن في الحركة على استقامة المحور y فوجد أن الشدة تصل إلى أقل قيمة لها عن الوضع y_{min} . (أ) أوجد y_{min} إذا كانت $D = 2.0$ m و $d = 1.0$ m . (ب) أوجد الزاوية θ في الشكل م 3-15 .



شكل م 3-15

34 ـ قارن عازف كمان النغمة الصادرة من أحد أوتار آلته بنغمة الوتر المقابل لكمان عازف آخر فلوحظ حدوث ضربات ترددها 1.3 Hz . فإذا كان تردد أحد الوترين 275 Hz ، فما هي الترددات الممكنة التي يهتز بها الوتر الآخر ؟

35 ـ تعزف آلتا بيانو نفس النغمة المدونة على النوتة الموسيقية ، ولكن تردد اهتزاز الآلة الأولى 320.4 Hz وتردد اهتزاز الثانية 321.1 Hz . ما هو تردد الضربات بين هاتين النغمتين ؟

القسم 10-15

36 ـ أنبوبة ذات طرف مغلق وآخر مفتوح طولها 76.4 cm . ما هي أقل ثلاثة ترددات ترن عندها هذه الأنبوبة ؟ ارسم شكل الموجة داخل الأنبوبة لكل تردد . كرر الحل بالنسبة لأنبوبة مماثلة ولكنها مفتوحة الطرفين .

37 ـ ما هي أصغر ثلاثة ترددات رنينية لأنبوبة مفتوحة الطرفين طولها 90.5 cm . ارسم شكل الموجة داخل الأنبوبة لكل تردد . كرر الحل بالنسبة لأنبوبة مماثلة أحد طرفيها مغلق .

38 ـ في تجربة كالمبينة بالشكل 14-15 لوحظ حدوث الرنين عندما يكون ارتفاع الماء في الأنبوبة 31.55 cm وحدوثه مرة أخرى عندما يكون ارتفاع الماء فيها 40.65 cm . فإذا لم يحدث أي رنين بين هذين الارتفاعين ، أوجد تردد الشوكة الرنانة .

39 ـ يريد رجل أن يعين عمق سطح الماء في بئر قديم باستعمال ماسورة من الحديد . ونظرًا لحساسية أذن هذا الرجل لدرجة الصوت ، قام الرجل بإجراء تجربة رنين مستعملا الماسورة باعتبارها أنبوبة مغلقة عند أحد الطرفين ومفتوحة عند الطرف الآخر . فإذا كان أقل تردد رنيني يقيسه الرجل 81 Hz . فعلى أي عمق يقع سطح الماء بالنسبة إلى فوهة الماسورة ؟

40 ـ يبلغ طول نفق لنكولن الذي يمر تحت نهر هدسون بمدينة نيويورك حوالي 2630 m . ما هي الترددات الرنينية للنفق ؟ ما

هى الأهمية العملية لذلك فى رأيك ، إن وجدت مثل هذه الأهمية ؟

■■ 41 ـ تهتز أنبوبة اهتزازًا رنينيًا عند الترددات المتعاقبة الآتية 415 Hz و 581 Hz و 747 Hz . (أ) ما هو التردد الرنينى الأساسى لهذه الأنبوبة ؟ هل هى مفتوحة الطرفين أم أن أحد طرفيها مغلق ؟

■ 42 ـ سرعة الصوت فى الهيدروجين حوالى 1270 m/s . فإذا ملأت أنبوبة ترددها الرنينى فى الهواء 550 Hz بغاز الهيدروجين ، فماذا سيكون التردد الرنينى الأساسى فى هذه الحالة ؟

■ 43 ـ تصدر أنبوبة أرغن معينة ترددًا أساسيًا قدره 630 Hz عندما تكون درجة حرارتها 18°C ، وتوجد أنبوبة أخرى مماثلة قريبة من سخان عند درجة حرارة قدرها 27°C . ما هو تردد الضربات المسموعة عندما تعزف الأنبوبتان معًا ؟

■ 44 ـ أنبوبتان متماثلتان لكل منهما طرف مغلق وآخر مفتوح وطولهما 67 cm . وضعت إحدى الأنبوبتين فى غرفة تحتوى على الأكسجين النقى ووضعت الأخرى فى غرفة تحتوى على النيتروجين النقى . فإذا استمعت إلى تسجيل لصوتى هاتين الأنبوبتين يصدران منهما بالتردد الأساسى لكل ، فما هو تردد الضربات التى تسمعها ؟

القسم 15-11

45 ـ بأى سرعة يجب أن تتحرك سيارة تجاهك بحيث يبدو تردد نفيرها أعلى بمقدار 5 فى المائة من قيمته عندما تكون السيارة ساكنة ؟ وبأى سرعة يجب أن تتحرك السيارة مبتعدة عنك لكى يكون تردد الصوت الذى تسمعه من نفيرها أقل بمقدار 5 فى المائة من قيمته عند سكون السيارة ؟

46 ـ طائر يطير مبتعدًا عنك بسرعة مقدارها 21.3 m/s وهو يصدح بنغمة نغية ترددها 2040 Hz . ما هو تردد الصوت الذى تسمعه إذا كانت درجة حرارة الهواء 15°C m/s .

■■ 47 ـ مصدر صوتى يقع فى مركز الإحداثيات ويرسل موجات ترددها f فى الاتجاه الموجب للمحور x أثناء هبوب الريح بسرعة مقدارها 17.5 m/s فى الاتجاه الموجب للمحور x أيضًا . (أ) أوجد التردد والطول الموجى للموجة الصوتية التى يسمعها مشاهد يقع موضعه على المحور x . اعتبر أن سرعة الصوت فى الهواء الساكن v . (ب) كرر الحل فى حالة هبوب الريح بنفس السرعة فى الاتجاه السالب للمحور x .

■■ 48 ـ يقترب مصدر صوتى تردده 440 Hz من حائط بسرعة مقدارها 12.5 m/s ، وتنعكس الموجة الصوتية بعد سقوطها على الحائط إلى الخلف فتصل إلى مشاهد متحرك مع المصدر . ما هو تردد الموجة المنعكسة كما يسمعها المشاهد ؟

■■ 49 ـ تغيرت درجة صوت صفارة الإنذار بسيارة إسعاف من 850 Hz إلى 770 Hz لحظة عبورها لك وأنت واقف على إفريز الشارع ، وكانت درجة حرارة الهواء عندئذ 10°C . بأى سرعة كانت تتحرك سيارة الإسعاف ؟

■■ 50 ـ يتحرك قطاران فى اتجاهين متضادين على خطى سكة حديد متوازيين بحيث كان كلاهما يقترب من إحدى المحطات . فإذا علمت أن تردد الصوت المنبعث من نفيرى القطارين 550 Hz ، وأن سرعة اقتراب أحد القطارين من المحطة 32 m/s ، فما هى سرعة القطار الآخر إذا كان تردد الضربات التى يسمعها مشاهد مساكن على المحطة 4.4 Hz ؟

القسم 15-12

■ 51 ـ تطير طائرة أفقيًا فوق منطقة صحراوية مسطحة بسرعة قدرها Mach 1.8 . سمع دوى اختراق حاجز الصوت فى نقطة معينة على الأرض بعد مرور زمن قدره 8.1 s اعتبارًا من لحظة عبور الطائرة فوق هذه النقطة مباشرة . افترض أن سرعة الصوت فى الهواء 350 m/s . على أى ارتفاع تطير الطائرة ؟

52 ـ تطير طائرة بسرعة فوق صوتية على ارتفاع معين سرعة الصوت عنده 320 m/s ، وقد لوحظ أن الموجة الصدمية تصنع زاوية قدرها 33.5° مع اتجاه الطائرة . ما هى سرعة الطائرة والعدد الماخى لها ؟

■ 53 ـ تتغير درجة الحرارة في الغلاف الجوى للأرض مع الارتفاع ، وبالتالى تتغير سرعة الصوت معه أيضا . وتكون درجة حرارة 218 K تقريبًا على ارتفاع 20 km ، بينما تكون 218 K على ارتفاع 1 km . لنفرض أن سفينة فضائية قد اقتحمت الغلاف الجوى من الفضاء الخارجي حيث كانت سرعتها 8700 m/s وهي على ارتفاع 20 km وأن سرعتها قد انخفضت إلى 4800 m/s لحظة وصولها إلى ارتفاع قدره 1 km . احسب العدد الماخى وزاوية الموجة الصدمية التى تسببها السفينة الفضائية على هذين الارتفاعين .

مسائل عامة

■■ 54 ـ سلك طوله 4.0 m وكثافته الطولية 2.2 g/m مثبت من طرفيه في قائمين بحيث كان الشد فيه 340 N . ويعطى هذا السلك تحت هذه الظروف نمطًا موجيًا مستقرًا يتكون من خمس عروات بين طرفيه . ويوجد بالقرب من هذا السلك أنبوبة رفيعة ذات كباس قابل للحركة يغلق أحد طرفيها . وبتحريك الكباس وجد أن الصوت الصادر من الوتر يسبب حدوث الرنين في الأنبوبة عندما يكون الكباس على بعد قدره 1.07 m من الطرف المفتوح للأنبوبة . بأى توافقية ترن الأنبوبة وما قيمة تردد الصوت ؟ افترض أن درجة حرارة الهواء في الغرفة 30°C .

■ 55 ـ ضبطت أنبوبة أرغن في بداية حفل موسيقي بحيث كان تردد توافقيتها الثالثة 1320 Hz . وقد كانت درجة الحرارة الابتدائية في قاعة الحفل 23°C ، ولكنها ارتفعت بمرور الزمن . وأثناء الاستراحة قام العازف بمقارنة تردد نفس توافقية أنبوبة الأرغن بنغمة قياسية ترددها 1320 Hz فسمع ضربات عددها 5 في الثانية الواحدة . ما هي درجة حرارة القاعة أثناء فترة الاستراحة ؟ (افترض أن طول الأنبوبة لم يتغير) .

■ 56 ـ النقطتان A و B في الشكل م 4–15 يمثلان مصدرين ساكنين لموجات صوتية متساوية التردد f . وبينما كانت مشاهدة تقود في سيارتها مقتربة من A ومبتعدة عن B بسرعة قدرها 100 km/h لاحظت المشاهدة أن تردد الضربات الناتجة عن تداخل صوتى المصدرين يساوى 20 Hz . احسب تردد الصوت المنبعث من المصدرين بفرض أن درجة حرارة الهواء 23°C .



شكل م 4–15

■ 57 ـ أراد شخص تعيين عمق بئر فألقى حجرًا فيه فسمع صوت ارتطامه بسطح الماء بعد زمن قدره 3.34 s من لحظة تحريره . ما عمق هذا البئر ؟ (إهمل مقاومة الهواء للحجر أثناء السقوط) .

■ 58 ـ إذا كان دخل قدرة مكبر استريو 0.50 mW وخرج قدرته بعد التكبير 90 W ، فما قيمة معامل كسب المكبر مقاسًا بالديسيبل ؟

■■ 59 ـ أنبوبة رفيعة جدًا ذات طرف مغلق وآخر مفتوح طولها 45 cm . وضع مصدر صوتى مهتز تردده 205 Hz فوق الطرف المفتوح مباشرة ثم عُجل مبتعدًا على الأنبوبة على استقامة محورها . عند أى سرعة للمصدر الصوتى يحدث أول اهتزاز رنينى للأنبوبة ؟ ما هي التوافقية المناظرة لهذا الرنين ؟ اعتبر أن درجة حرارة الهواء 0°C .

■■ 60 ـ قضيب من الألمنيوم طوله 10.6 m . عندما وضعت آلية مهتزة على استقامة محور القضيب تولدت فيه موجات صوتية طولية تتحرك بطول القضيب وتنعكس عند طرفيه . ما هو تردد المهتز عند حدوث الرنين الأساسى في القضيب ؟